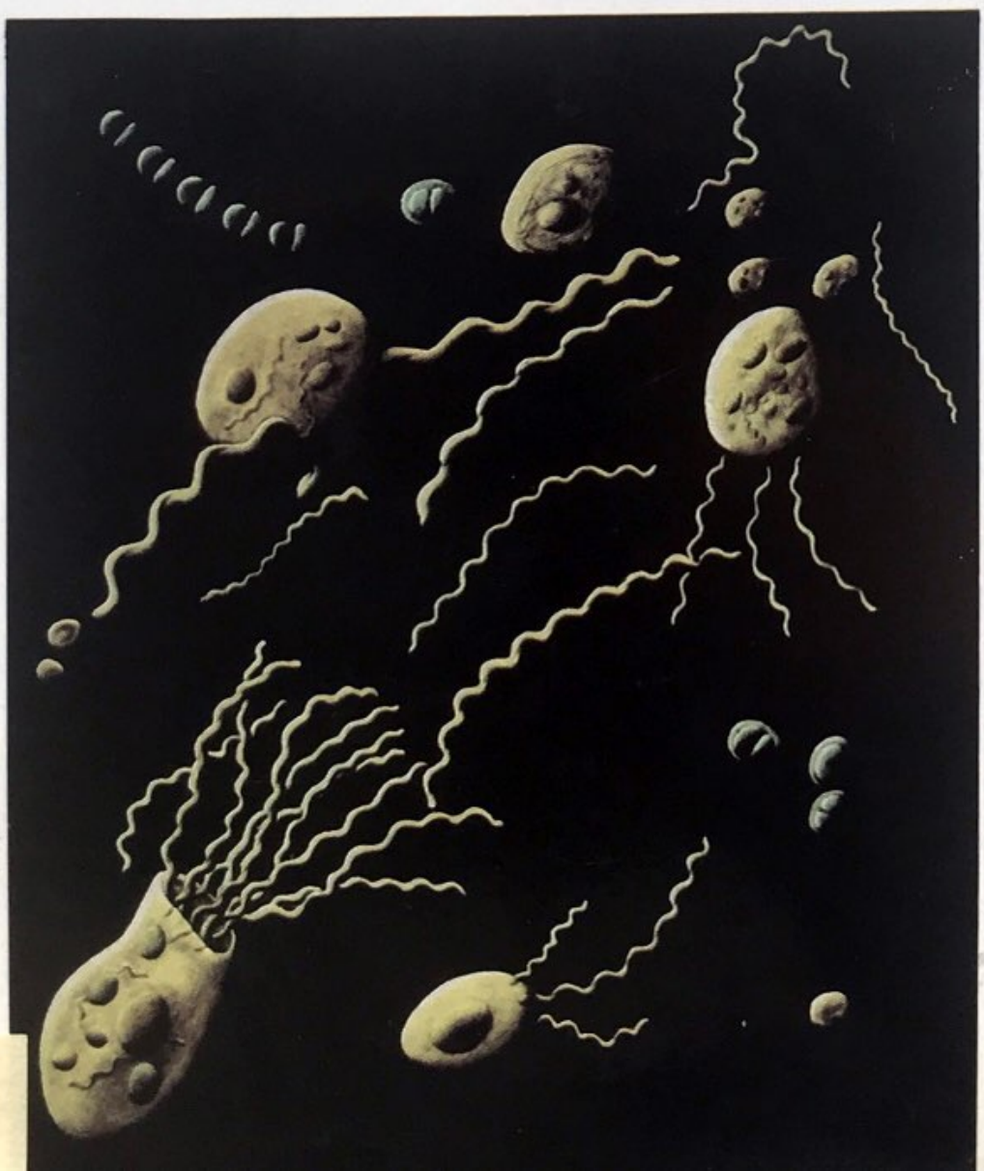
Lynn Margulis Dorion Sagan

MICROCOSMO

Dagli organismi primordiali all'uomo: un'evoluzione di quattro miliardi di anni



Lynn Margulis
Dorion Sagan

MICROCOSMO

Dagli organismi primordiali all'uomo:
un'evoluzione di quattro miliardi di anni

Premessa di Lewis Thomas

50

Sommario

IX *Premessa*
di Lewis Thomas

3 Introduzione: il microcosmo

13 Il microcosmo in espansione: un'anticipazione figurata

29 *1* Al di fuori del cosmo

39 *2* L'animazione della materia

53 *3* Il linguaggio della natura

65 *4* L'ingresso nel microcosmo

83 *5* Il sesso e lo scambio genetico a livello planetario

99 *6* L'olocausto causato dall'ossigeno

117 *7* Un nuovo tipo di cellula

131 *8* Vivere insieme

143 *9* Il cervello simbiotico

163 *10* L'enigma del sesso

177 *11* Gli ultimi a sbocciare: piante e animali

205 *12* L'uomo egocentrico

251 *13* Il supercosmo futuro

295 *Note*

301 *Glossario*

303 *Indice analitico*

Ringraziamenti

Nel 1980, l'agente letterario John Brockman, un personaggio pittoresco, il cui abbigliamento richiamava volutamente quello di un gangster italo-americano, giunse a Boston da New York per chiedere a Lynn Margulis di scrivere un libro. Senza quella prima visita e i successivi incoraggiamenti questo volume non avrebbe mai visto la luce. La nostra gratitudine, oltre che a lui, va alla sua collaboratrice Katinka Matson per tutto l'aiuto che ci ha dato durante la gestazione del testo, protrattasi per ben cinque anni. Vorremmo ringraziare anche Laszlo Meszoly: egli è riuscito a realizzare a puntinato, col poco tempo che gli abbiamo concesso, le tavole che evocano in maniera molto viva l'evoluzione della vita in successione temporale. I nostri ringraziamenti sono anche per Lewis Thomas, un attento osservatore dei fenomeni biologici: ci ha ispirato e ha accettato di scrivere la premessa; per David Abram, un uomo che ha viaggiato in tutto il mondo: ci ha fatto partecipi delle sue intuizioni sulla natura; infine, per il compianto Theodore Sturgeon, il cui romanzo fantascientifico *Microcosmic God* viene parafrasato in questo volume. Siamo anche profondamente grati ai nostri amici e familiari, ai curatori ed editori, e ai colleghi Morris Alexander, David Bermudes, Robert Boynton, Jack Corliss, Geoff Cowley, W. Ford Doolittle, Ann Druyan, Betsey Dexter Dyer, Stephen Jay Gould, Bruce Gregory, Ricardo Guerrero, James Halgring, Donald Johanson, Geraldine Kline, Edmond LeBlanc, James Lovelock, Heinz Lowenstam, David Lyons, Jennifer Margulis, Zachary Margulis, Phylis Morrison, Elaine Pagels, John Platt, Carl Sagan, Jeremy Sagan, Marjorie Sagan, Tonio Jerome Saga, Arthur Samuelson, Nathan Shafner, James Silberman, William Solomon, John Stolz, William Irwin Thompson, Paul Trachtman e Peggy Tsukahira.

Ci addolora che un collega e amico, Elso S. Barghoorn, che ci ha aiutato nelle prime fasi della lavorazione del libro, non sia vissuto abbastanza a lungo per vederlo completato.

Le ricerche scientifiche su cui si basa una parte del testo sono state sovvenzionate in gran parte dal servizio di biologia planetaria della NASA e

dalla scuola di perfezionamento della Boston University. Molte delle nostre conclusioni si fondano su ricerche e discussioni che sono state riportate dalla letteratura scientifica. Naturalmente abbiamo anche un debito notevole nei confronti di molti autori e scienziati che non abbiamo menzionato e la cui opera è stata la fonte di ispirazione per il nostro racconto.

Lynn Margulis e Dorion Sagan
Febbraio 1986

Premessa

di Lewis Thomas, M.D., President Emeritus,
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center

Lo scopo di una premessa è talvolta quello di dare al lettore un'anticipazione di ciò che troverà nel libro. Nel caso di questo volume il lettore, a meno che non sia stato a stretto contatto con gli avvenimenti recenti che si sono succeduti nel campo della microbiologia, della paleontologia e della biologia evoluzionistica, avrà una sorpresa dopo l'altra, se non addirittura uno shock dopo l'altro. Il libro verte sull'inestricabile legame tra tutte le creature appartenenti a questo pianeta, sia quelle attuali sia quelle, innumerevoli, vissute in passato. Lynn Margulis e Dorion Sagan propongono qui un nuovo modo di osservare il mondo, una visione diversa da quella sulla quale la maggior parte di noi era concorde alcuni decenni or sono. Questa visione nuova si basa su ricerche ben fondate, effettuate con differenti finalità da numerosi scienziati che lavorano in laboratori sparsi in tutto il mondo. I risultati che essi hanno ottenuto, riuniti e collegati, fanno concludere che, in natura, l'autonomia non esiste: la biosfera è un tutt'uno, un immenso sistema vivente integrato, un organismo.

Ricordo di aver presenziato a una serie di seminari, tenuti in un campus universitario e intitolati "Il posto dell'uomo in natura". Per lo più essi vertevano sul modo in cui l'uomo può gestire la natura migliorandola, così che le cose del mondo possano procedere in maniera più gradevole: come sfruttare di più le risorse energetiche della Terra, come conservare certe aree naturali a scopo ricreativo, come evitare l'inquinamento

dei corsi d'acqua, come controllare lo sviluppo demografico, tutte cose di questo genere. Il senso generale di tutti i discorsi era che la natura, di fatto, è un bene, un patrimonio che ci è stato trasmesso, che appartiene e viene gestito dall'umanità: una specie di parco, di zoo e di orto universale.

Questo è ancora un modo semplice di osservare il mondo, se si riesce a impedire che la nostra mente divaghi. Indubbiamente, da quando abbiamo cominciato a occupare la Terra, ci siamo quasi sempre comportati da specie dominante, da specie che controlla l'intero pianeta. All'inizio, forse, eravamo creature fragili, inaffidabili, appena discese dagli alberi e senza alcunché di cui vantarsi se non i pollici opponibili e i lobi frontali spropositati. Eravamo creature che cercavano riparo nelle grotte e che curavano il fuoco. Ma prendemmo il sopravvento e ora siamo dovunque, dominando ogni cosa, da un polo all'altro della Terra, dalle cime delle montagne alle profonde fosse oceaniche, colonizzando la Luna e osservando attentamente il sistema solare. Siamo la mente della Terra, il pinnacolo dell'evoluzione, il più sorprendente dei successi biologici. Ora e per sempre.

Ma c'è anche un altro modo per osservare noi stessi e questo libro ci guida appunto su questa via. In termini evoluzionistici, siamo gli ultimi arrivati. Possono esservi qua e là specie più giovani della nostra, ma nessuna è nella nostra scala, sicuramente nessuna è in una fase così iniziale del proprio sviluppo. Non possiamo fare risalire la nostra specie oltre poche migliaia di anni senza perdere di vista ciò che consideriamo il vero tipo umano: un'umanità che si esprime attraverso un linguaggio, che canta, che costruisce utensili, che si riscalda con il fuoco, che gode e scatena guerre. Come specie, siamo giovani, forse siamo appena all'inizio del nostro sviluppo, o stiamo ancora imparando a essere umani, siamo fanciulli immaturi di una data specie. E vulnerabili. E ancora soggetti a errore, col rischio di lasciare soltanto un sottile strato di fossili radioattivi.

Per avere una migliore prospettiva di noi stessi dobbiamo correggere la linea di discendenza a cui apparteniamo. Eravamo convinti di essere giunti ex novo, messi là dove eravamo da

un Organizzatore, forse non ancora del tutto pronti, ma in ogni caso già in grado di dare un nome a tutti gli animali. Quindi, dopo l'avvento di C. Darwin, dovemmo superare l'imbarazzo di avere da qualche parte, nel nostro albero genealogico, grosse scimmie antropomorfe e di dover accettare gli scimpanzé come cugini.

Molti ragazzi attraversano un periodo penoso nella loro prima adolescenza, quando sono a disagio nei confronti dei loro genitori e vorrebbero che fossero diversi, un po' più come i genitori dei ragazzi che si incontrano per strada. Non c'è da vergognarsi di avere come antenati ominidi dall'aspetto strano, ma la maggior parte di noi, se potesse scegliere, preferirebbe far risalire la nostra specie fino alle linee pure dei re e delle regine, fermandosi lì e non guardando oltre.

Ma veniamo ora al nostro dilemma. Il primo di noi, il vero punto di partenza di tutto il nostro lignaggio, si trova a circa tre miliardi e mezzo di anni or sono. Il protoantenato di tutta la vita successiva è una singola cellula batterica e noi risaliamo addirittura a *essa*.

Malgrado la nostra eleganza ed eloquenza come specie, malgrado i nostri voluminosi lobi frontali, malgrado tutta la nostra musica, non abbiamo progredito di molto rispetto ai microbi nostri predecessori. Essi sono ancora con noi, parte di noi. O, in altre parole, noi facciamo parte di loro.

Ammesso tutto ciò, la nostra è, in effetti, una grande storia, un'epica meravigliosa, che non è affatto avviata ancora alla conclusione. Non è altro che la saga della vita sul pianeta.

Lynn Margulis ha trascorso la maggior parte della sua esistenza professionale studiando i particolari di questa storia e vi ha aggiunto altri particolari significativi, attraverso le proprie ricerche scientifiche. Assieme a Dorion Sagan ha poi, letteralmente, raccolto tutto in questo libro straordinario, che è diverso da qualunque altra esposizione divulgativa sull'evoluzione che io abbia mai letto. È un racconto affascinante di quello che è di gran lunga lo stadio più lungo dell'evoluzione della biosfera, un arco di tempo di due miliardi e mezzo di anni, in cui i microbi nostri antenati, da soli, hanno stabilito la maggior parte delle norme di convivenza. Consuetudini che noi,

esseri umani, dovremmo oggi studiare per trovare in esse una soluzione al problema della nostra sopravvivenza.

La maggior parte delle trattazioni divulgative sull'evoluzione e sui problemi a essa connessi comincia solo da alcune centinaia di milioni di anni or sono, soffermandosi fugacemente sulle forme primordiali degli organismi pluricellulari e spostandosi quindi rapidamente sulla trionfante invenzione dei vertebrati, come se tutto il tempo precedente fosse stato occupato da cellule "primitive" e "semplici", che non hanno fatto altro che aspettare l'inizio dello spettacolo. Lynn Margulis e Dorion Sagan hanno modificato quest'errata interpretazione dei fatti reali della vita, dimostrando che i primissimi batteri sapevano già quasi tutto ciò che c'era da sapere sul modo di vivere in un sistema e, soprattutto, erano come noi li conosciamo oggi.

Forse esiste un nesso comune sulla nostra reale origine, ben maggiore di quanto pensiamo. Nell'antica radice da cui deriva il nome della nostra specie si trova un fossile linguistico: migliaia di anni or sono, allorché nacque la lingua indoeuropea (nessuno sa esattamente quando), terra si diceva *dhghem*. Da questa parola derivò la parola *humus*, lo strato di suolo "lavorato" dai batteri, come pure *umile* e *umano*. È questa, a grandi linee, soltanto una parabola filologica; alcuni particolari per completarla verranno da questo volume.

Microcosmo

A Morris Alexander,
padre e nonno,
e al suo amore per la vita

Introduzione: il microcosmo

Quando osserviamo la vita sulla Terra, non abbiamo difficoltà a pensare che siamo superiori a tutti. Il potere della consapevolezza, della società in cui viviamo e delle nostre invenzioni tecnologiche ci convince di essere la forma di vita più progredita su questo pianeta. Neppure la grande oscurità dello spazio ci rende umili. Consideriamo lo spazio come una terra di nessuno da invadere e conquistare, come riteniamo di avere conquistato la Terra.

La vita sulla Terra è stata studiata tradizionalmente come un prologo all'umanità: forme di vita "inferiori", prive di intelligenza, ci hanno preceduto e noi ora siamo sul pinnacolo dell'evoluzione. In effetti, ci consideriamo così simili a dei che pensiamo di poter prendere nelle nostre mani l'evoluzione, manipolando il DNA, la "spirale" della vita, secondo un nostro progetto. E studiamo il microcosmo, cioè l'antico mondo dei microrganismi, per scoprire i meccanismi segreti della vita, in modo da poter esercitare un controllo migliore su noi stessi e sugli altri esseri viventi sul pianeta, forse persino perfezionandoci.

Ma, negli ultimi decenni, nelle scienze della vita è avvenuta una rivoluzione: la testimonianza fossile di una vita microbica primordiale, la decifrazione del DNA e scoperte riguardanti la composizione della cellula umana hanno fatto fiorire alcune teorie sull'origine della vita e sulla dinamica dell'evoluzione sulla Terra.

Queste teorie hanno mostrato, in primo luogo, quale follia

sia considerare gli esseri umani qualcosa di speciale, di diverso, di eccelso. Il microscopio ha gradatamente messo in luce la vastità del microcosmo e ci sta dando oggi una sorprendente visione di quale sia il nostro vero posto nella natura. È evidente ormai che i microbi, che chiamiamo anche, secondo il contesto, microrganismi, germi, agenti infettanti, batteri e protozoi, sono non soltanto i "mattoni" della vita, ma si trovano anche in ogni struttura vivente nota e sono indispensabili per la sua sopravvivenza. Dal paramecio all'uomo, tutte le forme di vita sono dotate di un'organizzazione minuziosa, sono aggregati raffinati di una vita microbica in evoluzione. Lungi dall'essere rimasti indietro in una "scala" evolutiva, i microrganismi ci circondano e compongono il nostro essere. Tutti gli organismi attuali, essendo sopravvissuti fin dagli albori della vita lungo una linea che non si è mai interrotta, si trovano a un eguale livello di evoluzione.

Questa constatazione serve a smascherare in maniera netta la vanità e la presunzione insite nel tentativo di misurare l'evoluzione mediante una progressione lineare dal semplice (il cosiddetto inferiore) al più complesso (con gli esseri umani in cima alla gerarchia, come le forme situate in assoluto "più in alto"). Come vedremo, gli organismi più semplici e più antichi sono non soltanto i predecessori delle comunità biotiche terrestri e del loro attuale substrato, ma sono anche pronti a espandersi e a modificare se stessi e il resto dei viventi, se noi, organismi "superiori", fossimo così sciocchi da annientarci.

La visione dell'evoluzione come competizione cruenta cronica tra individui singoli e specie, distorsione della teoria darwiniana della "sopravvivenza del più idoneo", si dissolve dinnanzi alla visione nuova di una cooperazione continua, di un'interazione forte e di una dipendenza reciproca tra forme di vita. La vita non prese il sopravvento sul globo con la lotta, ma istituendo interrelazioni. Le forme di vita si moltiplicarono e divennero sempre più complesse attraverso una cooptazione di altre, non soltanto attraverso la loro estinzione.

Non potendo vedere il microcosmo a occhio nudo, tendiamo a sminuirne l'importanza. Eppure, dei tre miliardi e mezzo di anni, cioè da quando la vita è presente sulla Terra, l'intera

storia dell'umanità, dalle caverne ai palazzi in condominio, rappresenta molto meno dell'un per cento. Non soltanto la vita ebbe origine sulla Terra in una fase molto precoce della storia di questa come pianeta, ma per i primi due miliardi di anni essa fu rappresentata esclusivamente da microrganismi batterici.

In effetti, i batteri e la loro evoluzione sono così ricchi di significato che la divisione fondamentale tra le forme di vita sulla Terra non è tra piante e animali, come si suppone comunemente, ma tra procarioti, organismi composti di cellule prive di un nucleo ben definito, cioè i batteri, ed eucarioti, cioè tutte le altre forme di vita.[1] Nei primi due miliardi di anni sulla Terra, i procarioti continuarono a trasformare la superficie terrestre e l'atmosfera. Inventarono tutti i sistemi chimici miniaturizzati, essenziali per la loro esistenza: un'impresa che finora l'umanità non è riuscita a realizzare. Quest'antica "alta *bio*tecnologia" portò allo sviluppo della fermentazione, della fotosintesi e della respirazione aerobica e alla fissazione dell'azoto dell'aria. Portò anche alle crisi mondiali di carestia, inquinamento ed estinzione, molto prima dell'avvento delle forme di vita aventi una maggior mole.

Questi incredibili avvenimenti che ebbero luogo in una fase precoce della storia della vita sulla Terra furono possibili per l'interazione di almeno tre dinamiche dell'evoluzione, scoperte di recente. La prima è costituita dalle notevoli capacità di orchestrazione del DNA. Identificato nel 1944 da Oswald T. Avery, Colin MacLeod e Maclyn McCarty come la sostanza responsabile della trasmissione ereditaria, il DNA fu decifrato negli anni Sessanta, dopo che, nel 1953, James Watson e Francis Crick ne avevano rivelato la modalità di riproduzione. Sotto il controllo del DNA, la cellula vivente produce una copia di sé, sfidando così la morte e conservando la propria identità attraverso la riproduzione. Eppure, essendo anche suscettibile di mutazioni, che modificano a caso la sua identità, la cellula ha la capacità di sopravvivere al cambiamento.

La seconda dinamica evolutiva è una specie di ingegneria genetica naturale. Prove in suo favore si sono accumulate da tempo nel campo della batteriologia. Nel corso degli ultimi

cinquant'anni gli scienziati hanno osservato che i procarioti trasferiscono abitualmente e rapidamente differenti frammenti del loro materiale genetico ad altri individui. In qualsiasi momento, ogni batterio può utilizzare questi geni accessori, che provengono talvolta da ceppi molto diversi e svolgono funzioni per le quali il suo DNA non è competente. Alcuni di questi frammenti vengono ricombinati con i geni originali della cellula; altri vengono ulteriormente trasferiti. Alcuni frammenti genetici estranei possono inserirsi facilmente anche nell'apparato genetico delle cellule eucariotiche (per esempio, le nostre cellule).

Questi scambi fanno parte abitualmente del repertorio procariotico. Eppure, ancora oggi, molti batteriologi non afferrano il loro pieno significato e cioè che, come conseguenza di questa capacità, tutti i batteri del mondo hanno accesso a un unico pool genico e, pertanto, ai meccanismi adattativi dell'intero regno batterico. La velocità di ricombinazione è superiore a quella di mutazione: gli eucarioti potrebbero aver bisogno di un milione di anni per adattarsi a un cambiamento su scala universale al quale i batteri riescono, invece, ad adattarsi soltanto in pochi anni. Adattandosi costantemente e rapidamente alle condizioni ambientali, gli organismi del microcosmo sostengono l'intera comunità biotica, dato che la loro rete di scambi globali interessa, in definitiva, ogni pianta e animale vivente. L'uomo sta imparando proprio queste tecniche quando ricorre all'ingegneria genetica, per mezzo della quale vengono prodotte sostanze chimiche inserendo geni estranei in cellule che si riproducono. Queste tecniche cosiddette "nuove" sono, invece, utilizzate dai procarioti da miliardi di anni e, come risultato, il pianeta è reso fertile e abitabile da forme di vita di maggiori dimensioni. Ciò avviene grazie a un "superorganismo" costituito dai batteri, che comunicano e cooperano tra loro su scala universale.

Per quanto di vasta portata, la mutazione e il trasferimento genetico nei batteri non riescono da soli a spiegare l'evoluzione di tutte le forme di vita sulla Terra oggi. In una delle più stimolanti scoperte della moderna microbiologia, indizi che fanno pensare a una terza possibilità di cambiamento sono emersi osservando i mitocondri, minuscole inclusioni avvolte da

membrana e presenti nelle cellule degli animali, delle piante, dei funghi e dei protisti. I mitocondri, pur trovandosi al di fuori del nucleo nelle cellule moderne, hanno geni propri, costituiti da DNA. Diversamente dalle cellule, essi si riproducono per semplice divisione e lo fanno in tempi diversi da quelli della restante massa cellulare. Senza di loro, la cellula nucleata, e pertanto l'intera pianta o l'intero animale, non potrebbe utilizzare l'ossigeno e, di conseguenza, non potrebbe vivere.

Davanti ai biologi, che continuavano a interrogarsi e a meditare su questo punto, si schiuse alla fine uno scenario sorprendente: i discendenti di quei batteri che, tre miliardi di anni or sono, nuotavano nei mari primitivi respirando ossigeno, sono presenti oggi nei nostri corpi sotto forma di mitocondri. A un certo momento, gli antichi batteri si sono combinati con altri microrganismi, fissando all'interno di questi la loro residenza, provvedendo all'eliminazione delle scorie e al rifornimento di energia derivata da processi di ossigenazione in cambio di cibo e di protezione. Questi organismi "fusi insieme" si evolvettero poi in forme di vita più complesse, che respiravano ossigeno. Vi fu, dunque, in questo caso un meccanismo evolutivo più brusco della mutazione: una alleanza simbiotica che divenne permanente. Alleanze di questo tipo, con la creazione di organismi che non sono semplicemente la somma delle loro rispettive parti che entrano in simbiosi, ma piuttosto qualcosa di simile alla somma di tutte le possibili combinazioni di queste parti, sospingono gli esseri in via di sviluppo verso reami inesplorati. La simbiosi, cioè la fusione di organismi diversi in nuova collettività, risulta dunque un'importante forza di mutamento sulla Terra.[2]

Quando ci esaminiamo come prodotti di una simbiosi protrattasi per miliardi di anni, le prove a favore di una nostra origine plurimicrobica diventano schiaccianti. Il nostro corpo contiene in sé una vera e propria storia della vita sulla Terra. Le cellule conservano un ambiente ricco di carbonio e di idrogeno, come quello della Terra quando la vita ebbe inizio. Vivono in un mezzo costituito da acqua e sali, che ricorda la composizione dei mari primitivi: diventammo quelli che siamo grazie all'associazione di partner batterici in un ambiente ac-

quoso. Benché la dinamica evolutiva del DNA, il trasferimento genetico e la simbiosi non siano stati scoperti fino a quasi un secolo dopo la morte di Darwin, avvenuta nel 1882, egli ebbe la perspicacia di scrivere: «Non riusciamo a capire a fondo la meravigliosa complessità di un essere organico; senonché, in base all'ipotesi ora proposta, questa complessità risulta notevolmente accresciuta. Si deve considerare ogni creatura vivente come se fosse un microcosmo, un piccolo universo formato da una schiera di organismi che si autopropagano, tanto piccoli da non poterli quasi concepire e numerosi quanto le stelle in cielo».[3] La strana natura di questo piccolo universo costituirà proprio il tema di questo libro.

Nei particolari della loro struttura le cellule rivelano i segreti dei loro antenati. Le immagini al microscopio elettronico di cellule nervose mettono in evidenza, in tutti gli animali, numerosi organelli appariscenti, i "microtubuli". Le ciglia con movimento ondulatorio, che sono presenti nella mucosa di rivestimento della gola, e la coda degli spermatozoi umani, un flagello con battito a frustino, hanno entrambi la stessa insolita distribuzione dei microtubuli, a disco combinatore telefonico, che hanno le ciglia dei ciliati, un gruppo di microrganismi ben affermati, che comprendono più di 8000 specie diverse. Questi stessi microtubuli compaiono in tutte le cellule degli animali, delle piante e dei funghi ogniqualvolta esse si dividono. E constano, enigmaticamente, delle stesse proteine che sono presenti nel cervello umano. Queste proteine sono straordinariamente simili ad alcune di quelle che si trovano in certi batteri che si spostano a grande velocità e hanno una forma che ricorda il cavatappi.

Queste e altre vestigia viventi di individui un tempo separati, scoperte in varie specie, non fanno che accrescere la certezza che tutti gli organismi visibili si siano evoluti per simbiosi, cioè vivendo insieme in una condizione di reciproco beneficio mediante la condivisione permanente di cellule e corpi. Benché, come vedremo, alcuni particolari dell'origine batterica dei mitocondri, dei microtubuli e di altre componenti cellulari siano difficili da spiegare, quegli scienziati che hanno familiarità con gli stili di vita del microcosmo concordano in linea generale sul modo in cui l'evoluzione può operare per simbiosi.

Il processo simbiotico avanza incessantemente. Noi, membri del macrocosmo, continuiamo a interagire con il microcosmo e a dipendere da esso, come pure reciprocamente, tra di noi, dipendiamo l'uno dall'altro. Certe famiglie di piante, per esempio le leguminose, che comprendono il pisello, il fagiolo e altre specie affini quali trifoglio e veccia, non riescono a vivere in un terreno povero di azoto senza batteri azotofissatori nei loro noduli radicali, e noi stessi non possiamo fare a meno dell'azoto che proviene da queste piante. Né i bovini né le termiti riescono a digerire la cellulosa dell'erba e del legno quando mancano comunità di microbi particolari, che sono normalmente presenti nel loro intestino. Un buon 10% del nostro peso secco consiste di batteri, alcuni dei quali, pur non facendo parte del nostro corpo in modo congenito, sono assolutamente indispensabili per la nostra sopravvivenza. Questa coesistenza, che non va considerata come una semplice stravaganza della natura, è la materia prima dell'evoluzione. Se, per esempio, l'evoluzione continuasse ancora per alcuni milioni di anni, quei microrganismi che producono vitamina B_{12} nel nostro intestino diventerebbero parte integrante delle nostre cellule. Un'aggregazione di cellule specializzate può diventare un organo. Si è addirittura assistito in laboratorio all'unione di batteri un tempo letali con amebe; si è creata così, nel tempo, una nuova specie di ameba ibrida.

Questa rivoluzione nello studio del microcosmo ci mette di fronte a una situazione elettrizzante: non è irragionevole supporre che la consapevolezza che ci consente di sondare l'attività delle cellule che costituiscono il nostro organismo possa aver avuto origine nelle capacità concertate di milioni di microbi, che si sono evoluti per simbiosi per diventare il cervello umano. Questa consapevolezza ci ha portato oggi a "rappezzare" il DNA e abbiamo cominciato ad attingere all'antico processo del trasferimento genetico nei batteri. La nostra capacità di produrre nuovi generi di vita può essere vista come il modo più recente in cui la memoria organica (cioè il ricordo del passato e la sua attivazione nel presente) diventa più acuta. In uno di quei giganteschi circuiti della vita che fanno sempre riferimento a se stessi, la mutabilità del DNA ci ha reso consapevoli

della possibilità di modificarlo. La curiosità, la sete di sapere, l'entusiasmo di entrare nello spazio e di diffondere noi stessi e le nostre sonde su altri pianeti e al di là di essi costituiscono in parte la lama tagliente di quelle strategie che la vita mette in atto per espandersi e che ebbero inizio nel microcosmo all'incirca tre miliardi e mezzo di anni or sono. Non siamo che il riflesso di un'antica tendenza.

Dai primi batteri ai batteri attuali, miriadi di organismi formatisi per simbiosi sono vissuti e sono morti. Ma il comune denominatore microbico rimane essenzialmente immutato. Il nostro DNA deriva, lungo una sequenza ininterrotta, dalle stesse molecole che erano presenti nelle cellule primordiali, formatesi ai bordi dei primi oceani caldi e poco profondi. I nostri corpi, come quelli di tutti gli esseri viventi, conservano in sé l'ambiente di una Terra passata. Coesistiamo con i batteri di oggi e ospitiamo in noi vestigia di altri batteri, inclusi simbioticamente nelle nostre cellule. In questo modo, il microcosmo vive in noi e noi in esso.

Alcuni potrebbero trovare quest'idea allarmante, sconvolgente. Oltre a far scoppiare quel pallone gonfiato che è la nostra presunzione di sovranità su tutto il resto della natura, essa lancia la sfida anche alle nostre concezioni di individualità, di unicità e di indipendenza. Non rispetta nemmeno la visione che abbiamo di noi stessi come esseri fisici ben distinti, separati dagli altri viventi. Il pensare all'umanità e all'ambiente che la circonda come a un mosaico di vita microscopica è come immaginare che essa venga presa, dissolta, annientata. Ancora più allarmante è la conclusione filosofica alla quale arriveremo più avanti, e cioè che il possibile controllo cibernetico della superficie terrestre da parte di organismi non intelligenti metta in dubbio la presunta unicità della consapevolezza intelligente umana.

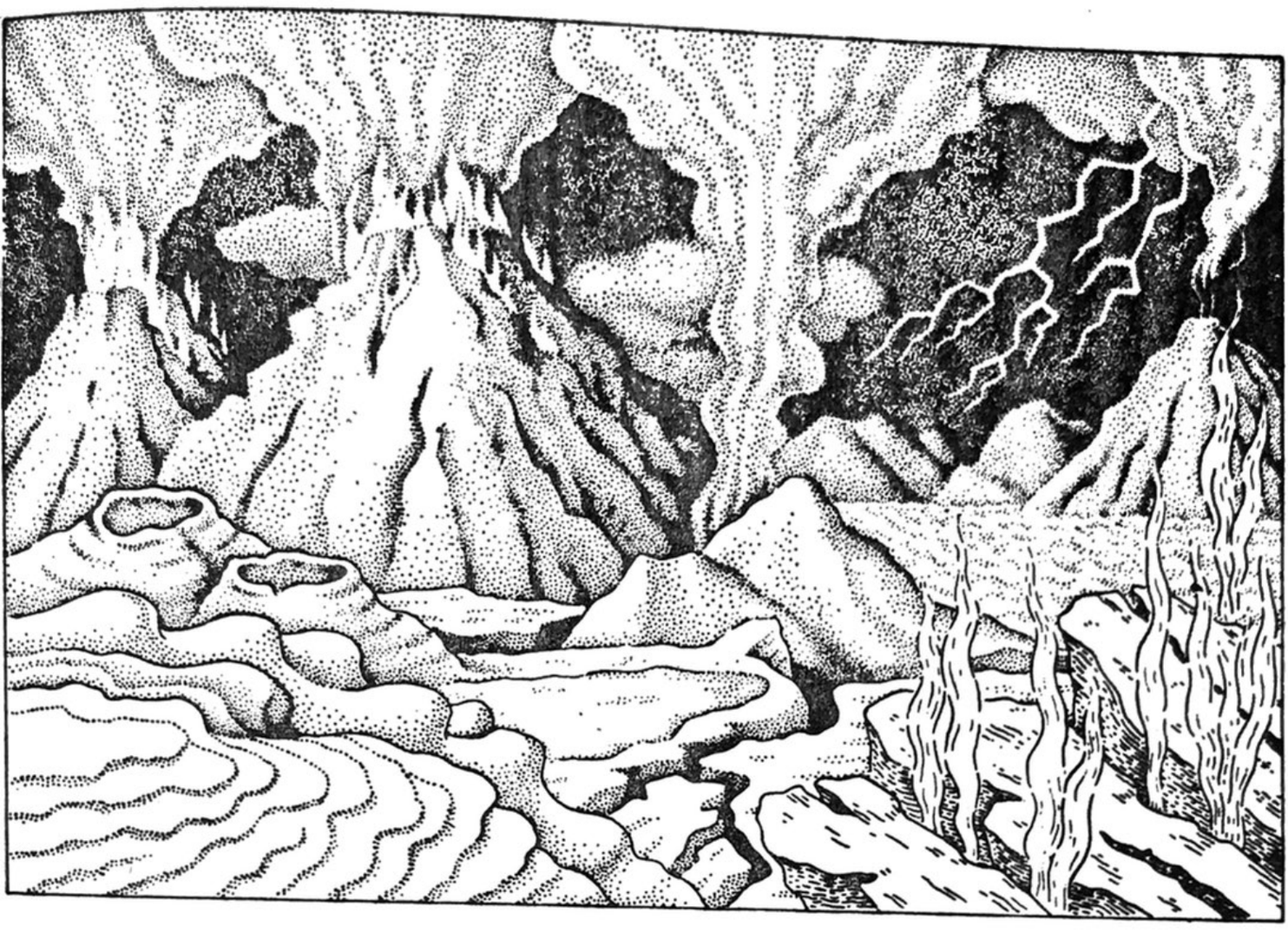
Paradossalmente, ingigantendo il microcosmo per trovare le nostre origini, possiamo apprezzare chiaramente sia la grandiosità sia l'irrilevanza dell'individuo. La più piccola unità vivente, per esempio una singola cellula batterica, è un monumento di organizzazione e di funzionalità, che non trova pari nell'universo quale noi lo conosciamo. La storia di ogni indivi-

duo che cresce, che raddoppia la propria mole e che si riproduce, è una storia di grande successo. Eppure, proprio come il successo del singolo individuo si riassorbe in quello della specie a cui egli appartiene, così la specie viene inglobata nell'intreccio che interessa tutti i viventi: un successo che ha un ordine di grandezza ancora superiore.

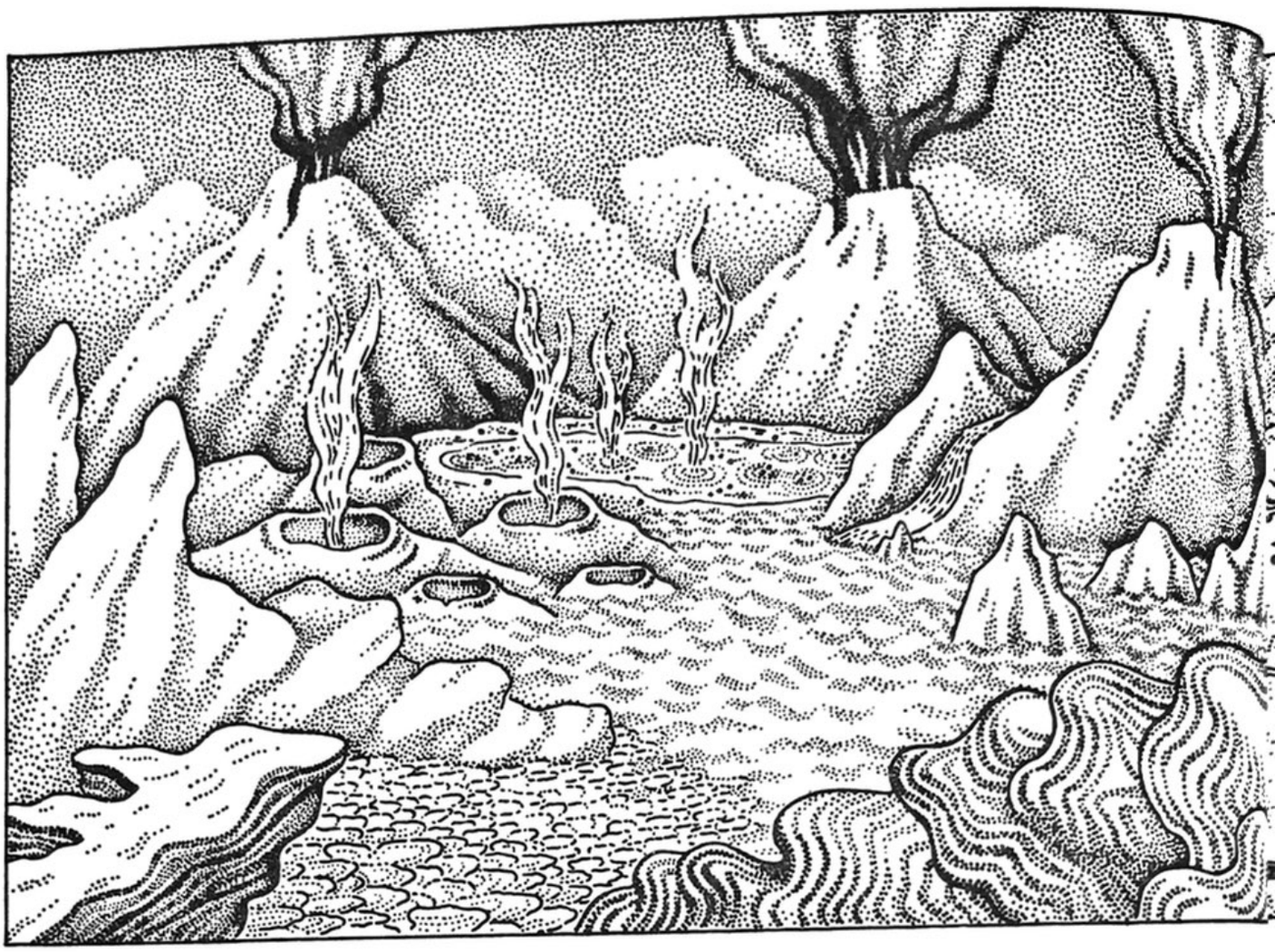
È allettante, anche per gli scienziati, lasciarsi entusiasmare da storie di personaggi giunti al successo partendo dal nulla. Dai discepoli di Darwin agli esperti contemporanei di ingegneria genetica, la scienza ha divulgato l'idea che la specie umana, sulla Terra, si trovi alla sommità della "scala" evolutiva e che, con la tecnologia, sia andata oltre i limiti della stessa evoluzione. Qualche scienziato eminente e raffinato, come per esempio Francis Crick nel volume *Life itself*, dice che la vita in generale, e la coscienza umana in particolare, sono un tale miracolo da non poter essere affatto di origine terrestre, ma, al contrario, da dover essere state originate in un altro punto dell'universo.[4] Altri ancora credono che gli esseri umani siano prodotti da una "intelligenza superiore", dotata di un atteggiamento paterno: che siano i figli di un patriarca divino.

Questo libro è stato scritto per dimostrare che concezioni del genere sottovalutano la Terra e le vie della natura. Nulla prova che gli esseri umani siano i sommi amministratori della vita su questo pianeta, né la discendenza svilita di un'entità extraterrestre superintelligente. C'è la prova, invece, che siamo il frutto della ricombinazione di potenti comunità batteriche, con una storia di molti miliardi di anni. Facciamo parte di un intreccio aggrovigliato che deriva dall'originaria conquista della Terra da parte dei batteri. Le capacità di intelligenza e tecnologia non ci appartengono in modo specifico, ma sono di tutti i viventi. Poiché raramente gli attributi utili vengono scartati nel corso dell'evoluzione, è probabile che i nostri poteri, derivatici dal microcosmo, permarranno nel microcosmo. Intelligenza e tecnologia, mantenute in incubazione dal genere umano, appartengono in realtà al microcosmo e può darsi che sopravviveranno alla nostra specie in forme del futuro che vanno oltre la nostra limitata immaginazione.

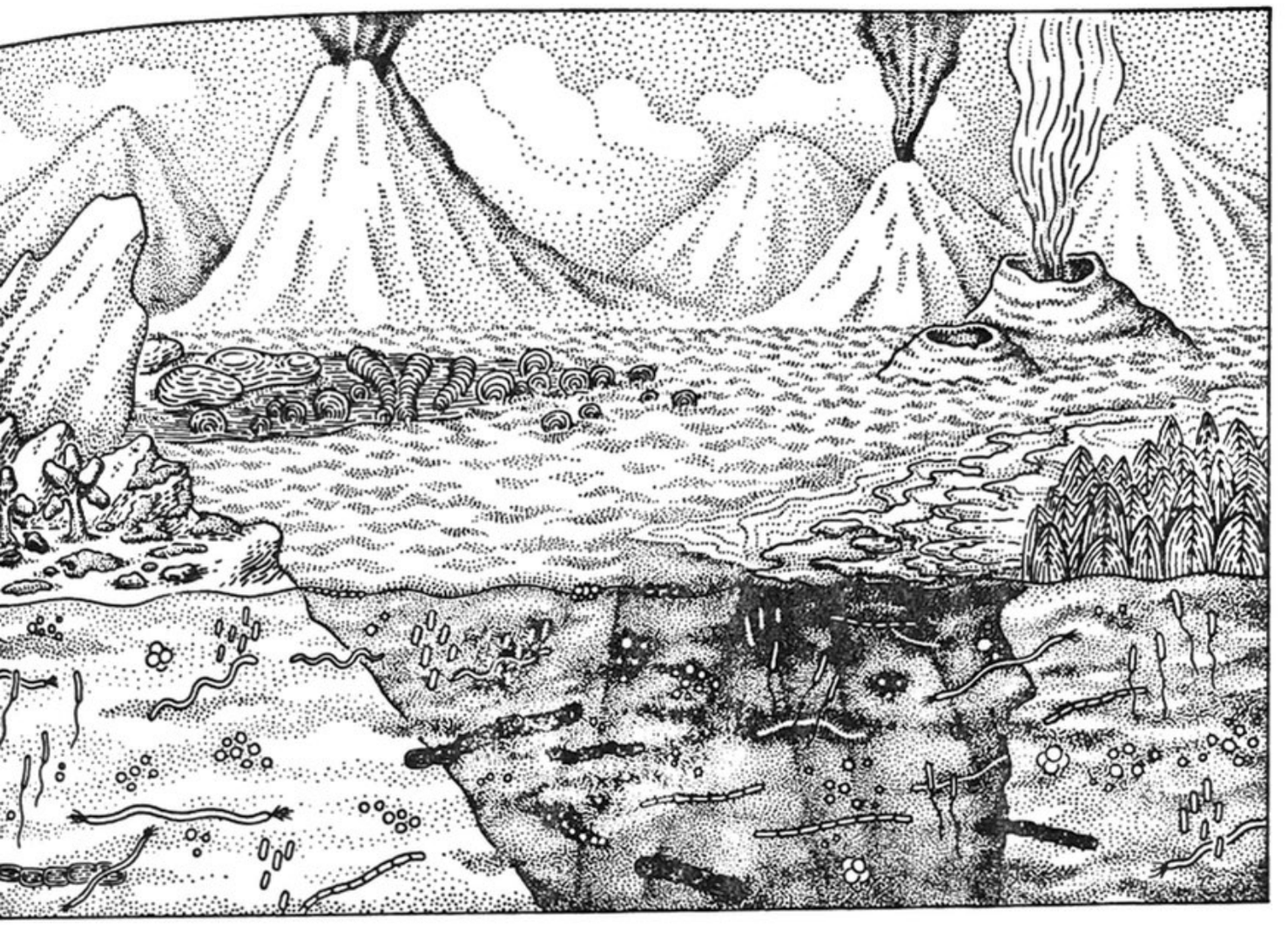
Il microcosmo in espansione: un'anticipazione figurata



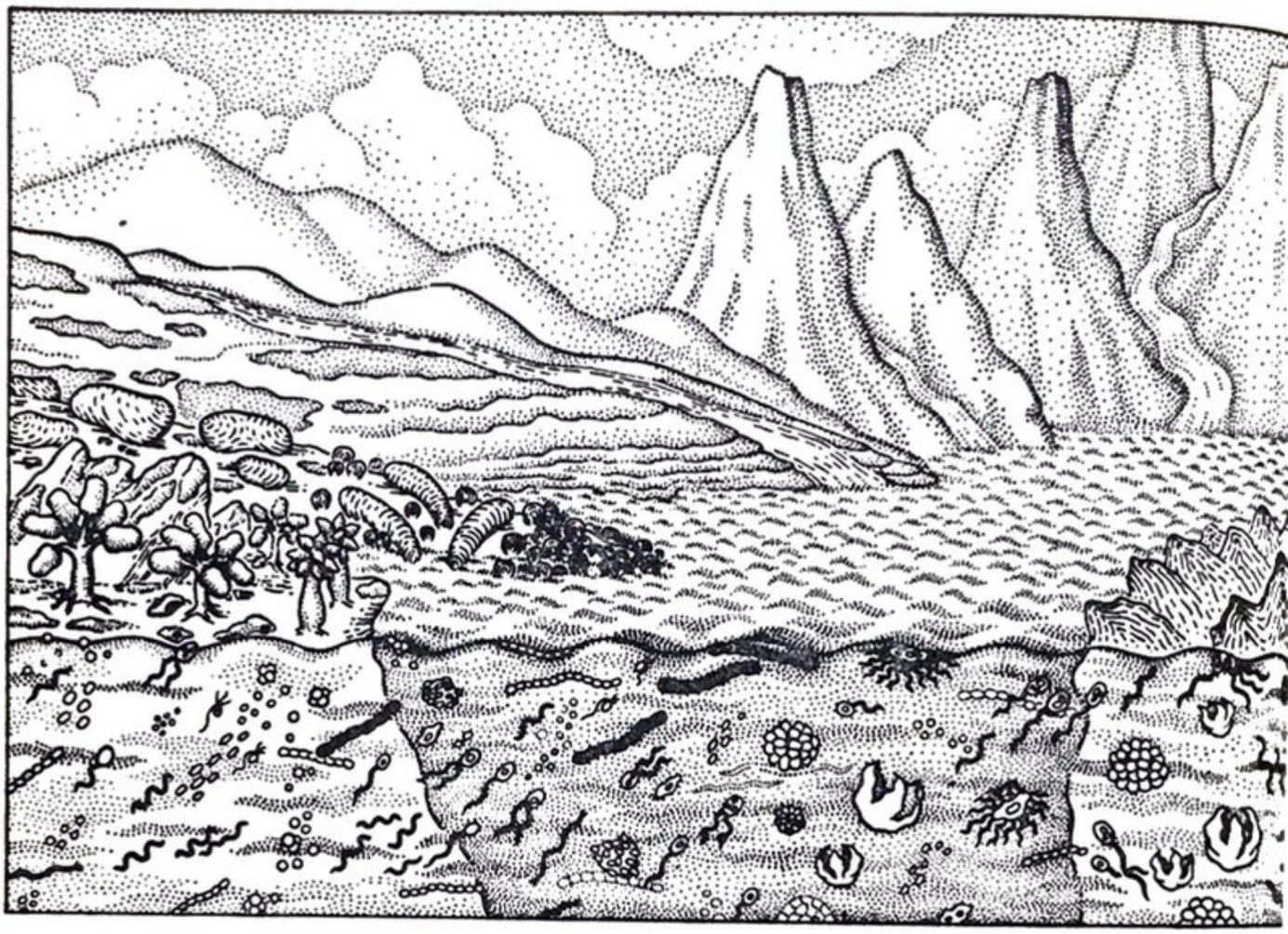
4 miliardi di anni or sono EONE ADEANO
Il microcosmo comincia a formarsi da detriti dell'esplosione di una supernova.



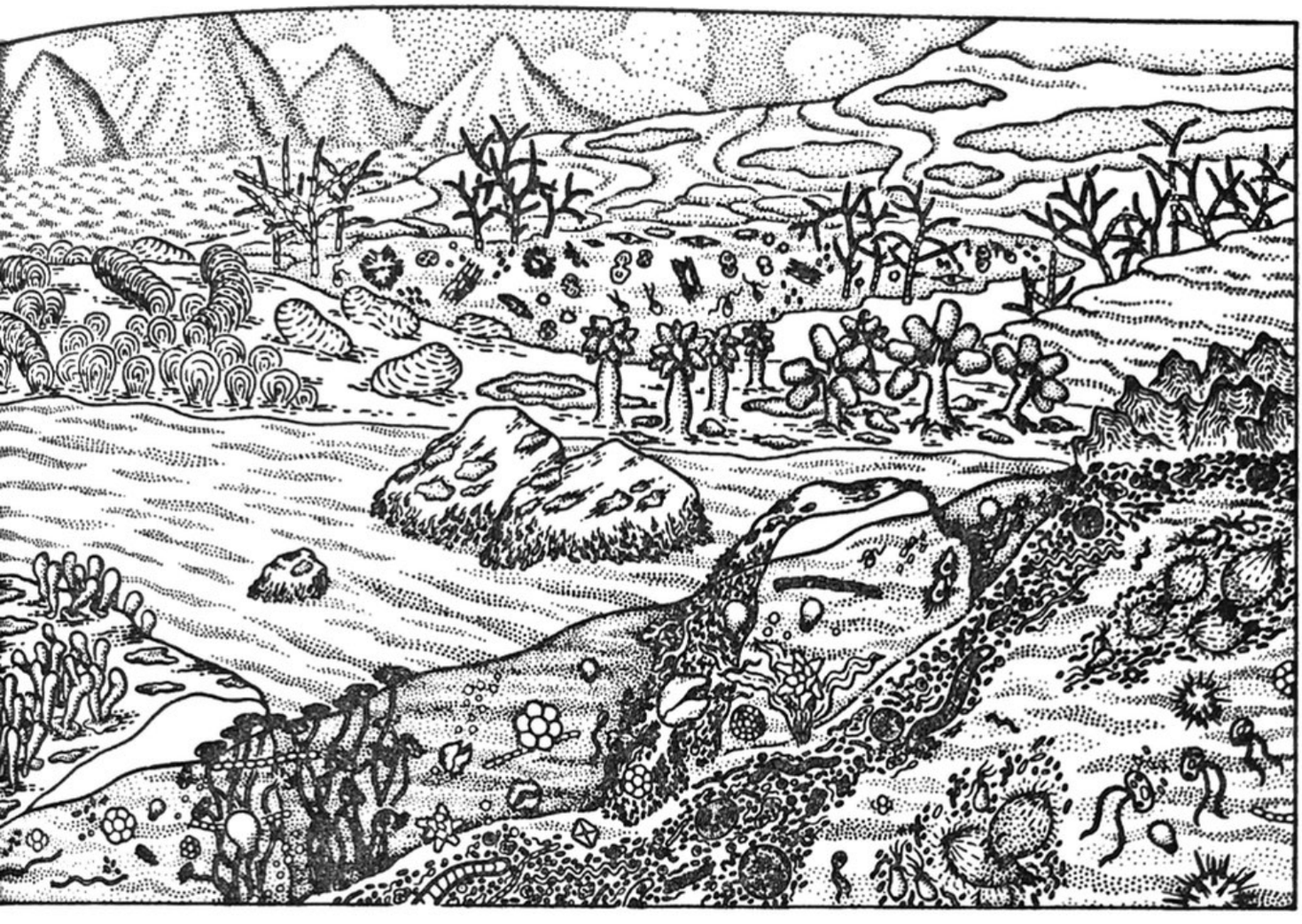
3 miliardi di anni or sono EONE ARCHEANO
I microbi, mentre si accrescono, trattengono minerali e formano così strati rocciosi nelle acque poco profonde degli oceani.



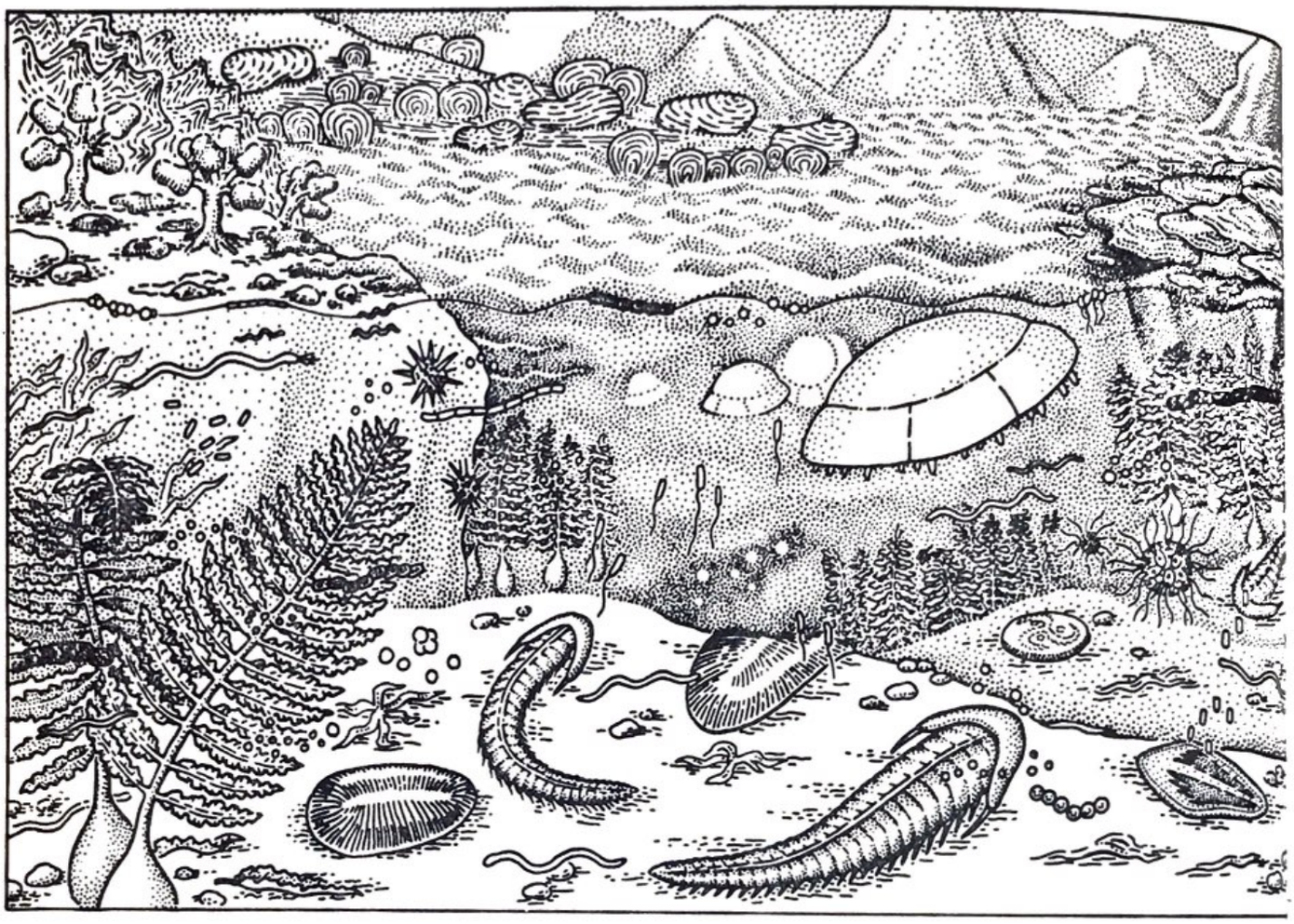
2 miliardi di anni or sono INIZIO DELL'EONE PROTEROZOICO
L'ossigeno comincia ad accumularsi nell'atmosfera a livelli pericolosi, come conseguenza della fotosintesi batterica.



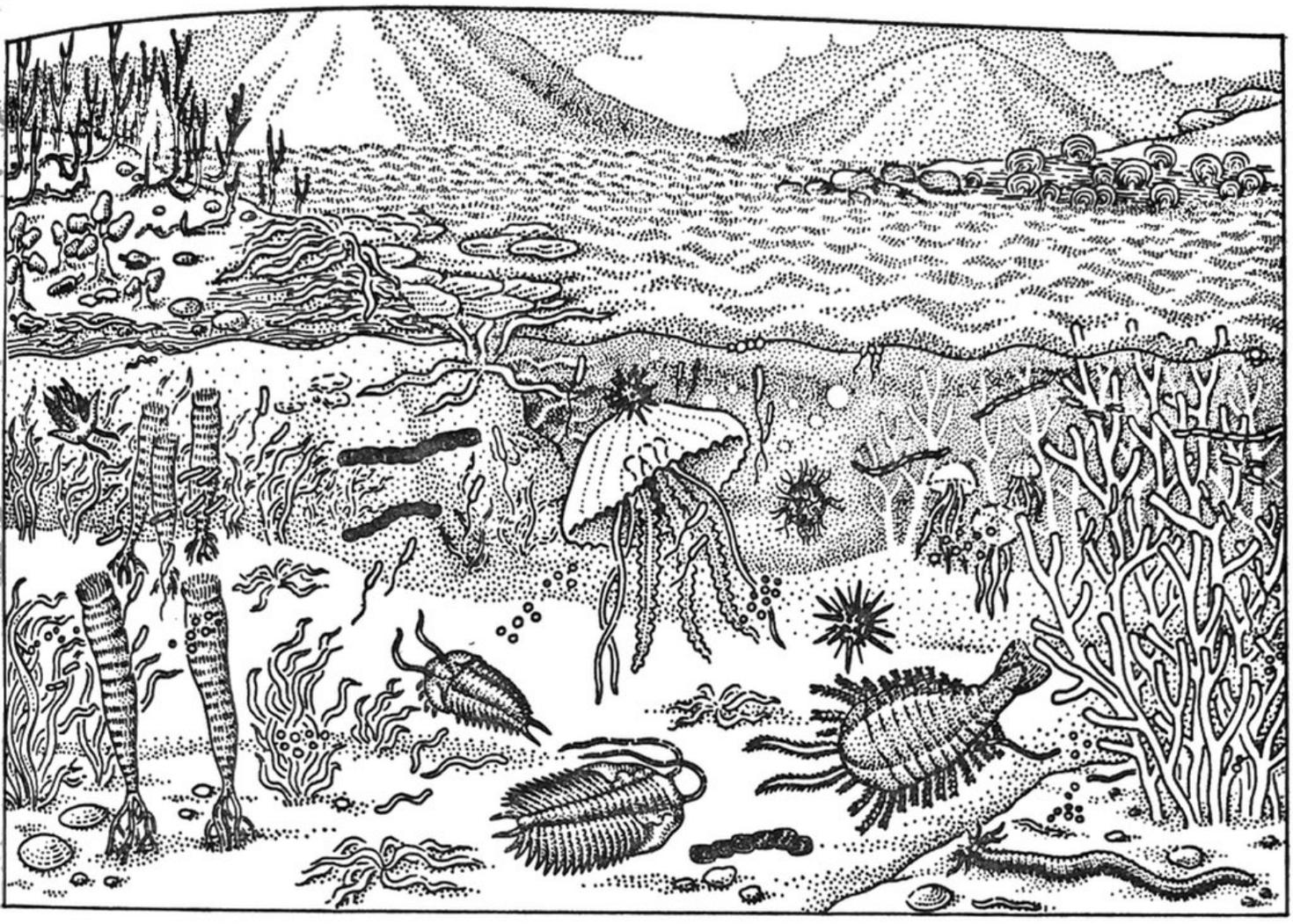
1,3 miliardi di anni or sono EONE PROTEROZOICO
I batteri si uniscono e si diffondono sulla terraferma come organismi compositi.



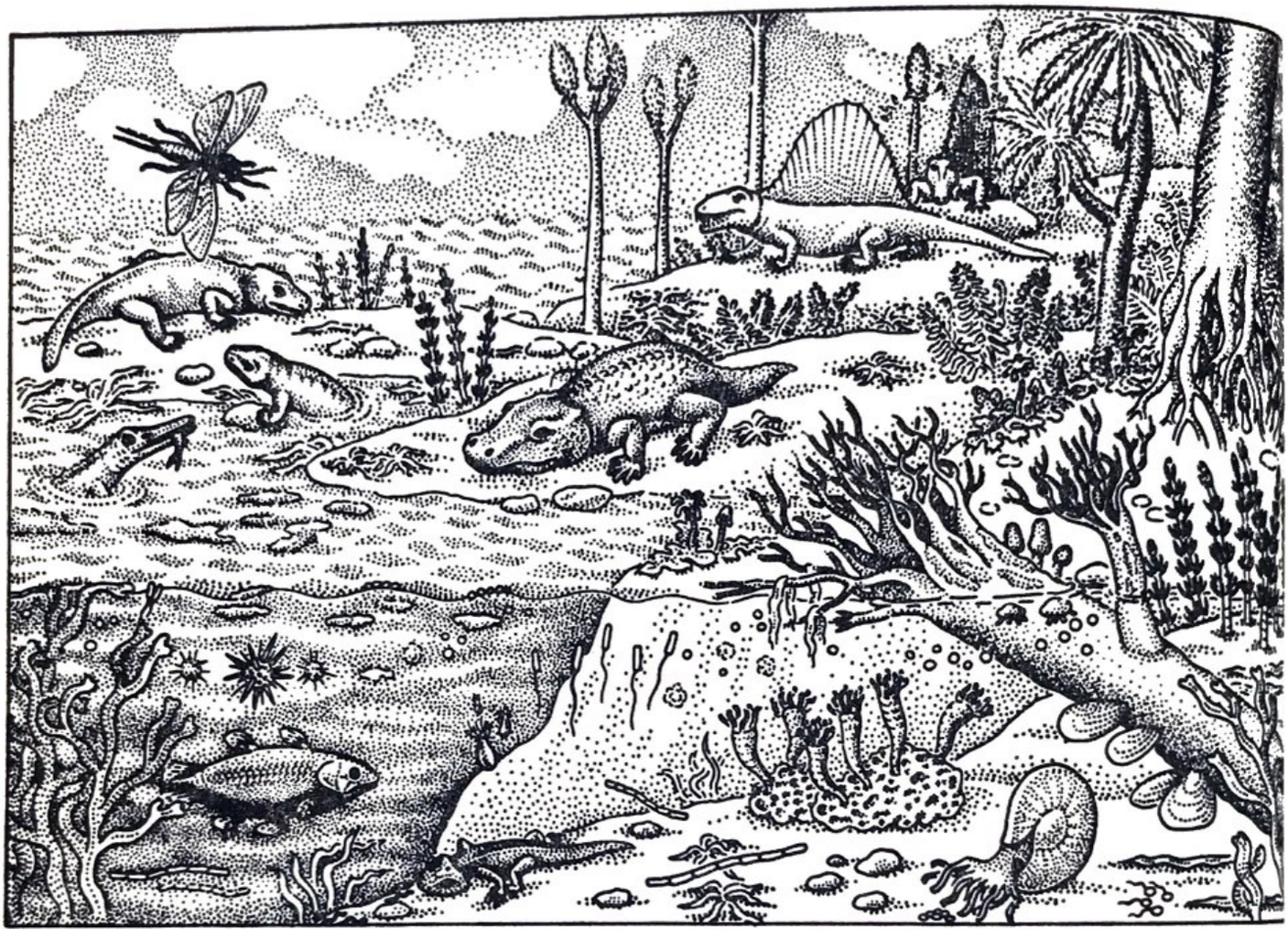
0,8 miliardi di anni or sono EONE PROTEROZOICO
Le collettività del microcosmo si evolvono negli antenati delle piante e degli animali.



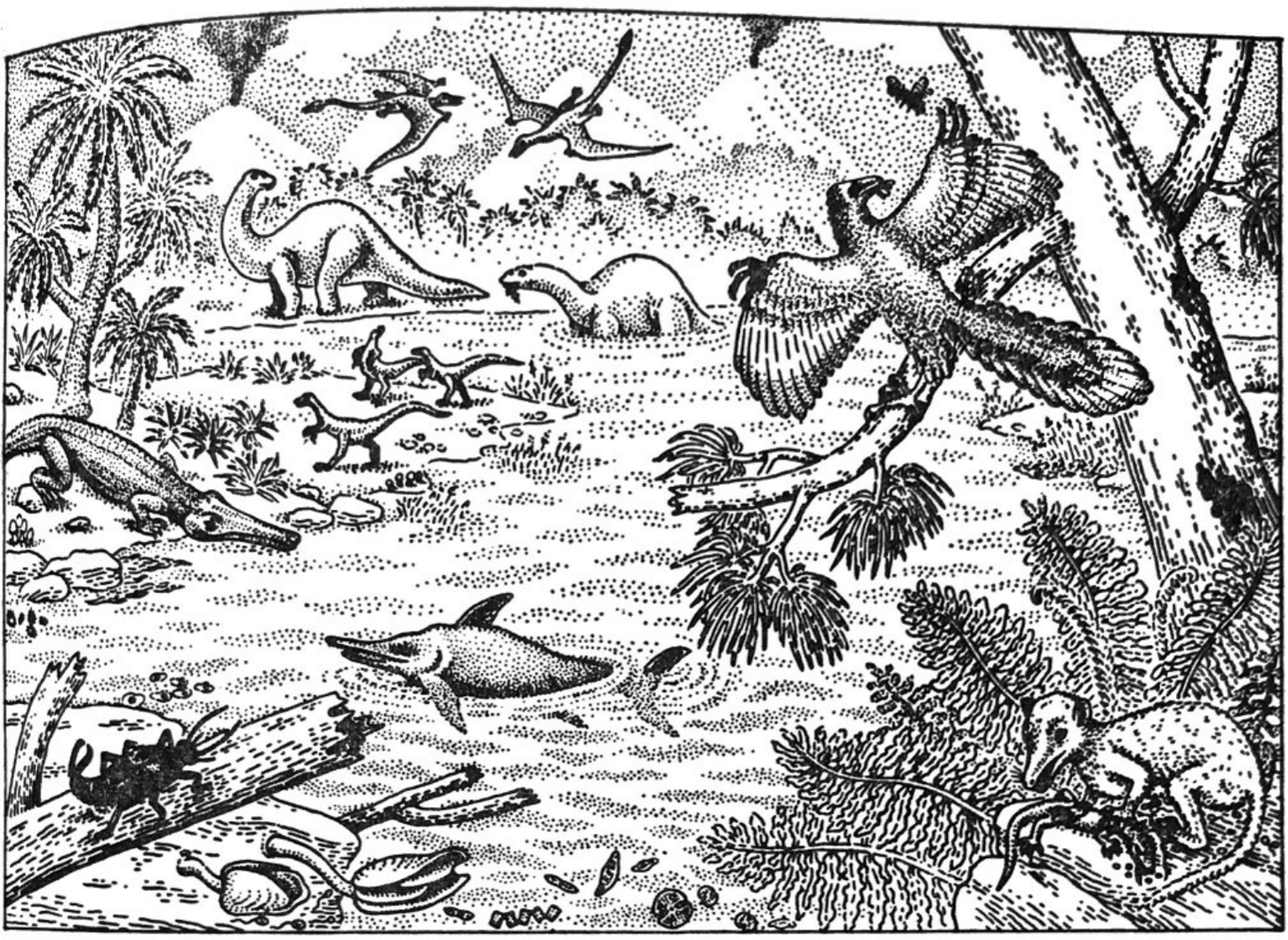
0,7 miliardi di anni or sono FINE DELL'EONE PROTEROZOICO
Animali marini dal corpo molle usurpano il dominio ai microbi.



0,5 miliardi di anni or sono INIZIO DELL'ERA PALEOZOICA
Gli animali formano parti dure, utilizzando i detriti di depositi cellulari.

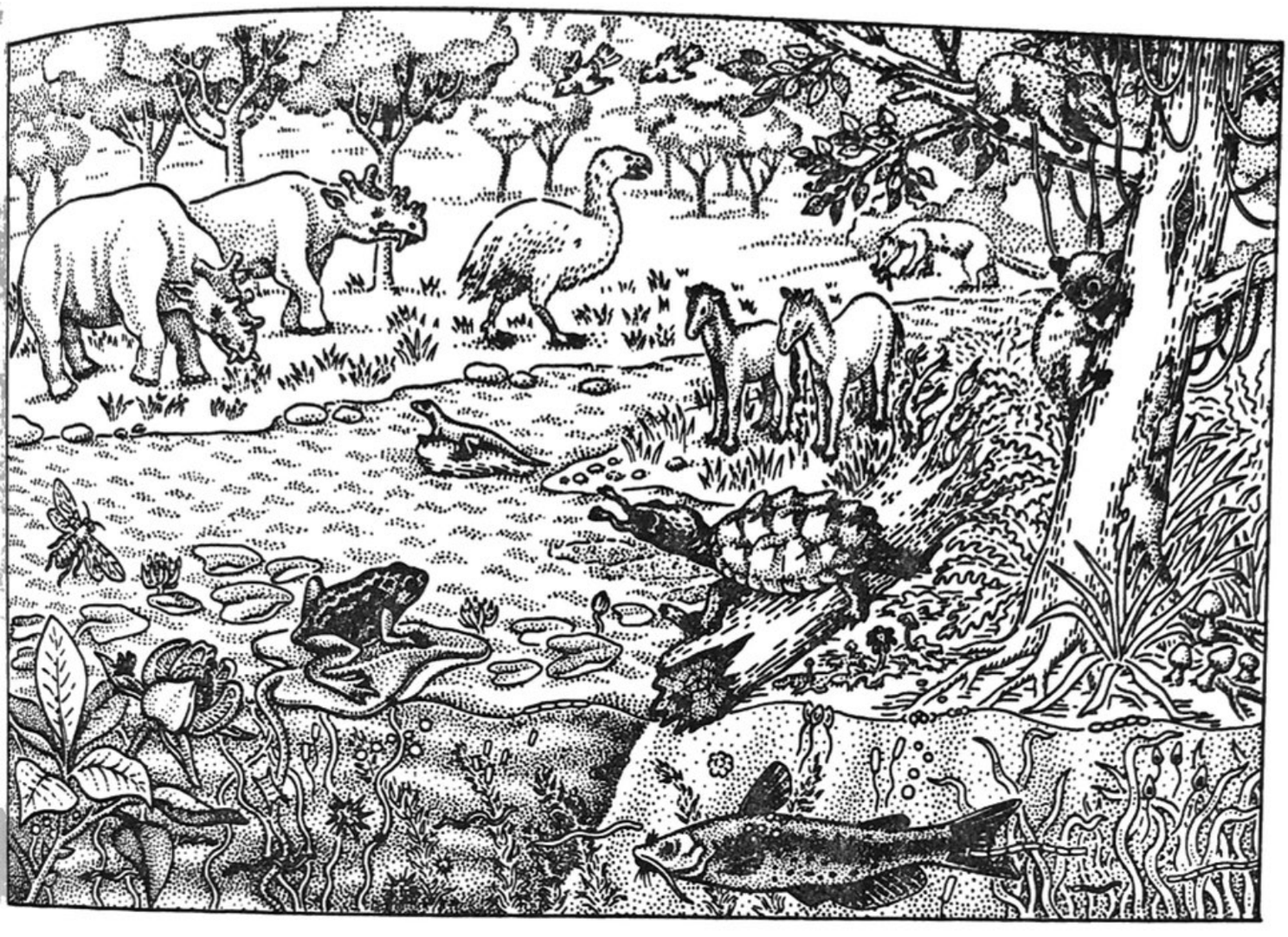


0,3 miliardi di anni or sono FINE DELL'ERA PALEOZOICA
I microbi vengono portati a riva negli intestini di animali che vagano ai bordi dell'acqua.

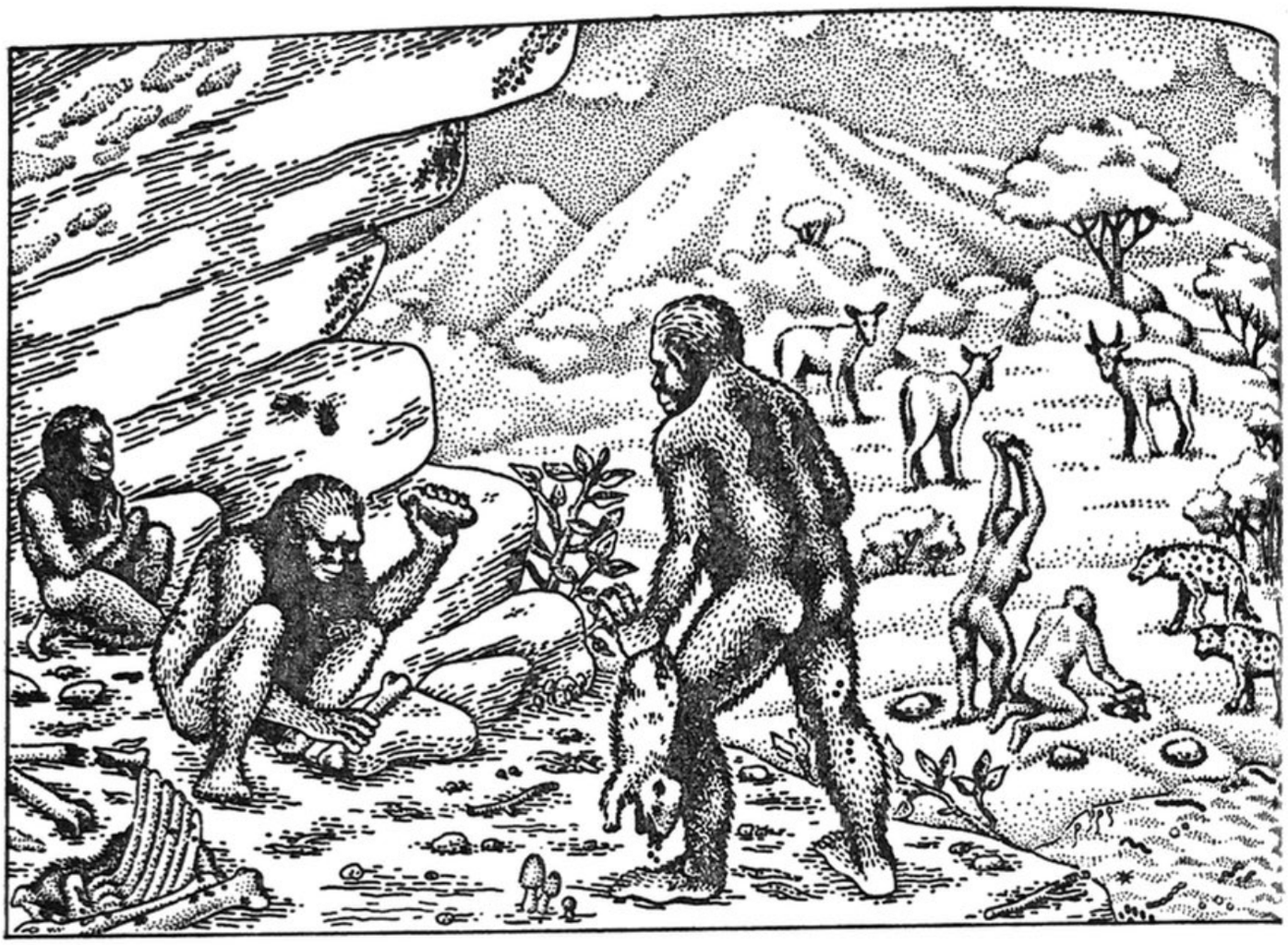


0,2 miliardi di anni or sono INIZIO DELL'ERA MESOZOICA
Cominciano a evolversi i primi mammiferi, mentre i rettili occupano i mari e i cieli.

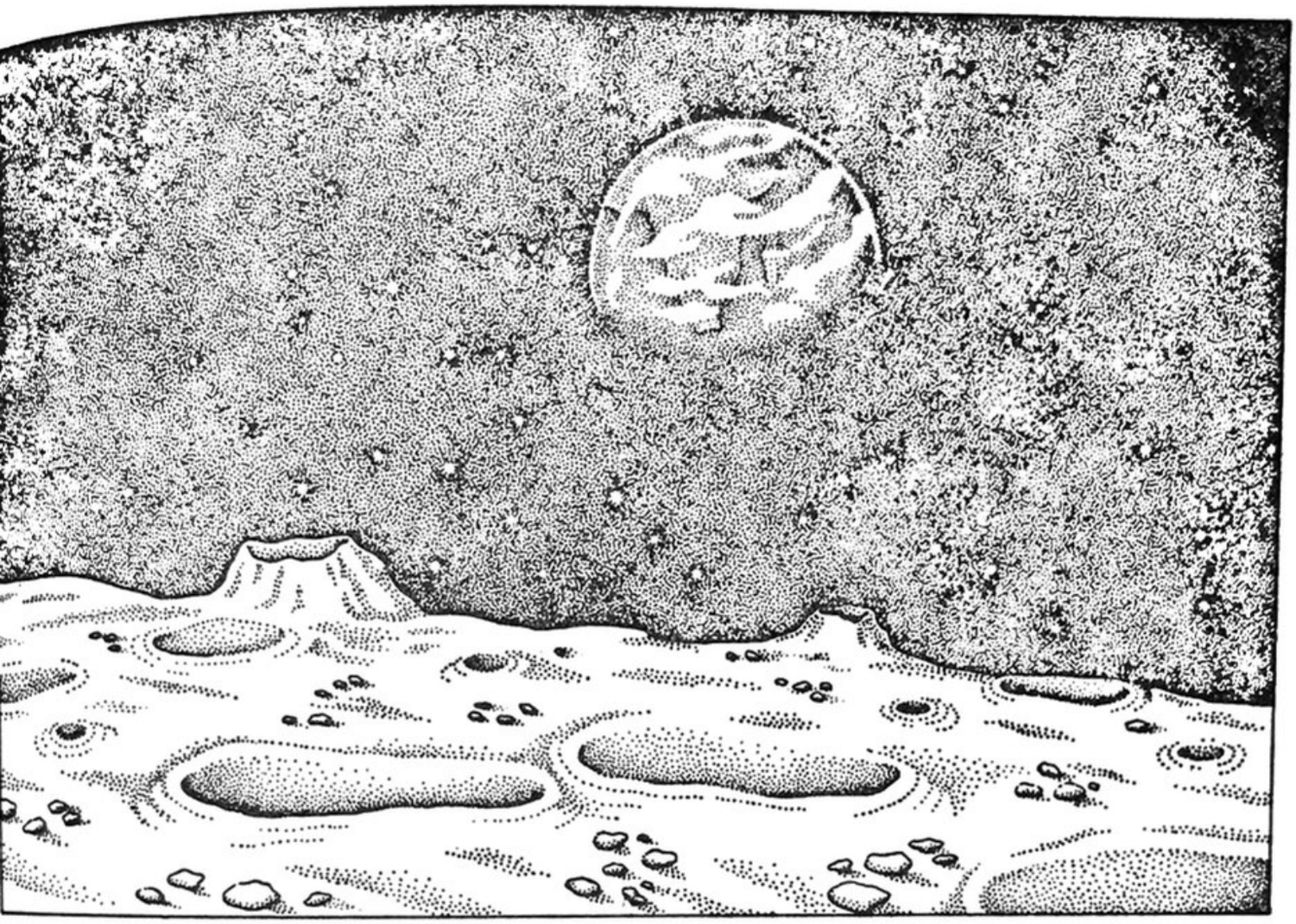
0,07 miliardi di anni or sono FINE DELL'ERA MESOZOICA
Il microcosmo si espande in forma di rettili mostruosi, di grandi foreste e di enormi rupi calcaree formate dai gusci dei microbi.



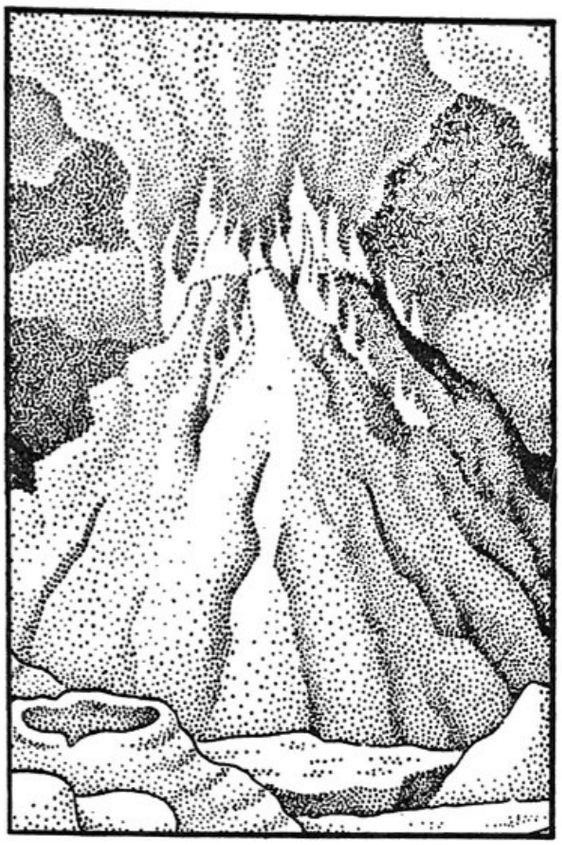
0,05 miliardi di anni or sono INIZIO DELL'ERA CENOZOICA
Squadre di microbi-mammiferi vagano verso le calotte polari,
si arrampicano sugli alberi e sulle montagne più alte.



0,003 miliardi di anni or sono FINE DELL'ERA CENOZOICA
Uomini-scimmia, il cui sistema nervoso deriva da aggregazioni di batteri, cominciano a servirsi di utensili.



Attuale EONE FANEROZOICO
La tecnologia porta il microcosmo nel cosmo.



Capitolo 1

Al di fuori del cosmo

Dal momento in cui consideriamo le origini su scala cosmica, siamo costretti ad accettare una visione di noi stessi come parte, una minuscola parte invero, dell'universo. Gli atomi che compongono il nostro corpo non furono creati, infatti, quando fummo concepiti, ma poco dopo la nascita dell'universo stesso.

È una verità astrofisica assodata che le stelle del cielo si allontanino l'una dall'altra a velocità straordinarie. Se, nella nostra mente, invertiamo questa tendenza giungiamo al Big Bang, l'ipotetica liberazione di tutta l'energia, materia e antimateria, nell'universo. Come ogni volta in cui si cerca di scavare in ciò che Shakespeare chiamava "il confuso passato e abisso del tempo", non dobbiamo considerare anche le nostre migliori ipotesi o estrapolazioni, relativamente lineari, delle condizioni del presente nel passato verità assolute. Lievi alterazioni, anche nelle premesse meno importanti, possono condurre a notevoli distorsioni se amplificate su un arco di tempo di 15 miliardi di anni, che rappresenta la presunta età dell'universo. Cionondimeno, queste estrapolazioni permettono di avere il quadro migliore del cosmo precedente l'evoluzione della vita nel microcosmo, e del microcosmo e della sua incessante espansione.

Nel primo milione di anni di espansione dopo il Big Bang, l'universo si raffreddò, passando da 100 miliardi di kelvin, secondo la stima del fisico Steven Weinberg, a circa 3000 kelvin,

Tabella 1

Scala del tempo geologico

(milioni di anni or sono[1])

Inizio dell'eone	*Eoni*	*Ere*	*Periodi*		*Epoche*	
4500	Adeano					
3900	Archeano	Prefanerozoica	date di inizio e di fine per i periodi e le epoche			
2500	Proterozoico					
580			Cambriano	580-500		
			Ordoviciano	500-440		
		Paleo-	Siluriano	440-400		
		zoico	Devoniano	400-345		
		580-245	Carbonifero	345-290		
			Permiano	290-245		
	Fanerozoico	Meso-	Trias	245-195		
		zoico	Giurese	195-138		
		245-66	Cretaceo	138-66		
					Paleocene	66-54
		Ceno-	Paleogene	66-26	Eocene	54-38
		zoico			Oligocene	38-26
		66-0				
					Miocene	26-7
			Neogene	26-0	Pleiocene	7-2
					Pleistocene	2-0,1
0					Recente	0,1-oggi

[1] semplificata e non in scala.

punto nel quale un singolo protone e un singolo elettrone poterono unirsi per formare idrogeno, il più semplice e più abbondante elemento presente nell'universo.[5] Gli atomi di idrogeno si riunirono formando le supernovae, nubi enormi che, nell'arco di miliardi di anni, si contrassero da densità cosmiche a densità submicrocosmiche. Per semplice forza di gravità, il nucleo delle supernovae divenne così caldo da innescare reazioni termonucleari, che crearono nell'universo, dall'idrogeno e da particelle subatomiche disparate, tutti gli elementi più pesanti che conosciamo oggi. La ricchezza di idrogeno si riscontra ancora nei

nostri corpi, in primo luogo nell'acqua (conteniamo più atomi di idrogeno che di qualunque altro tipo). I nostri corpi fatti di idrogeno rispecchiano un universo di idrogeno.

Gli elementi appena formati si riversarono nello spazio sotto forma della polvere e dei gas che compongono le nebulose galattiche. All'interno di queste si formarono altre stelle e, talvolta, i loro satelliti, anch'essi sotto forma di particelle di polvere e di gas, che gravitavano l'una verso l'altra, collassando e concentrandosi fino a quando si produssero le reazioni nucleari. Prima che, all'interno della nostra nebulosa solare, in corrispondenza di un braccio esterno della Via Lattea, si raccogliesse la prima materia che poteva essere chiamata Terra, erano già trascorsi da cinque a quindici miliardi di anni ed erano già avvenuti miliardi di processi di coalescenza, che avrebbero dato origine alle stelle dell'universo.

Nella nube gassosa, destinata a diventare la Terra, erano presenti idrogeno, elio, carbonio, azoto, ossigeno, ferro, alluminio, oro, uranio, zolfo, fosforo e silicio. Anche gli altri pianeti del nostro sistema solare all'inizio erano analoghi ammassi di gas e di particelle di polvere. Ma tutti si sarebbero raffreddati, e avrebbero vagato nello spazio senza vita come detriti privi di uno scopo, se non fosse stato per l'enorme stella formatasi dal centro della nebulosa, la quale attrasse nella propria orbita i corpi celesti più piccoli che si stavano solidificando e si infiammò in un incendio stabile e duraturo che coinvolse i suoi satelliti con continue emanazioni di luce, di gas e di energia.

A questo punto, circa 4, 6 miliardi di anni or sono, la massa terrestre si trovava già in condizioni che l'avrebbero resa idonea alla comparsa della vita. In primo luogo, essa era vicina a una fonte di energia: il Sole. In secondo luogo, tra tutti e nove i principali pianeti orbitanti attorno al Sole, essa non era a una distanza così ravvicinata da consentire che tutti i suoi elementi fossero eliminati come gas o liquefatti come roccia fusa. Né era abbastanza distante perché i suoi gas venissero congelati come ghiaccio, ammoniaca e metano, una situazione che si verifica oggi su Titano, la più grossa luna di Saturno. L'acqua è liquida sulla Terra, ma non su Mercurio, dove è tutta evaporata nello

spazio, o su Giove, dove è ghiaccio. Infine, era sufficientemente grande da avere un'atmosfera propria, la quale permetteva una continua circolazione degli elementi; non era, tuttavia, grande al punto che la sua gravità mantenesse un'atmosfera troppo densa per consentire alla luce del Sole di passare.

Quando il Sole si infiammò, una raffica esplosiva di radiazioni pervase il suo sistema nascente e sconvolse le atmosfere primitive della Terra e degli altri pianeti interni al sistema. L'idrogeno, un gas troppo leggero per essere trattenuto dalla forza di gravità terrestre, o rimaneva sospeso nello spazio o si combinava con altri elementi, producendo gli ingredienti necessari a comporre la ricetta per la vita. Dell'idrogeno che rimaneva, una parte si combinava con il carbonio, producendo metano (CH_4), una parte con l'ossigeno, producendo acqua (H_2O), una parte con l'azoto, producendo ammoniaca (NH_3) e una parte, infine, con lo zolfo, producendo acido solfidrico (H_2S).

Questi gas, ridistribuiti e ricombinati in composti a catena lunga, fanno parte praticamente di ogni componente del nostro corpo. Si conservano ancora come gas nelle atmosfere dei grandi pianeti esterni (Giove, Saturno, Urano e Nettuno), oppure come solidi congelati nelle superfici di ghiaccio di tali pianeti. Invece, sulla Terra, il pianeta più piccolo, recente e infuocato, fenomeni più complessi della gravità cominciarono a coinvolgerli in processi ciclici che li avrebbero mantenuti in quella sede fino a oggi.

La furia degli eventi e il calore in cui si formò la Terra primitiva erano tali che, nei primi anni dell'eone Adeano (4500--3900 anni or sono), non esistevano né terra solida, né oceani o laghi, forse neppure la neve e il nevischio degli inverni nordici. Il pianeta era una palla infuocata di lava fusa, che bruciava per il calore che emanava dal decadimento dell'uranio, del torio e del potassio radioattivi, presenti nel suo nucleo. L'acqua, che fuoriusciva dall'interno della Terra sotto forma di geyser, era così calda che non ricadeva mai sulla superficie terrestre come pioggia, ma rimaneva nella parte alta dell'atmosfera come vapore che non condensava. L'atmosfera era impregnata

di cianuro e di aldeide formica, due veleni. Non c'era ossigeno respirabile, né organismi capaci di utilizzarlo.

Nessuna roccia terrestre è sopravvissuta a questo primordiale caos infernale. L'Adeano viene datato partendo da meteoriti e rocce prelevate dagli astronauti dell'Apollo sulla Luna, dove non c'è aria e la temperatura cominciò a raffreddarsi 4600 milioni di anni or sono, quando la Terra era ancora infuocata. Circa 3900 milioni di anni or sono anche la superficie terrestre si raffreddò, formando una crosta sottile che poggiava precariamente sulla struttura sottostante, il mantello ancora fuso. La crosta veniva bucata da sotto e compressa dall'alto. I vulcani eruttavano in corrispondenza di fenditure e spaccature, proiettando violentemente verso l'alto materiale vetroso fuso. Le meteoriti, alcune enormi come montagne e più esplosive della somma delle testate nucleari di entrambe le superpotenze, si schiantavano violentemente al suolo, provocando la formazione di crateri nel terreno sconvolto e facendo sollevare grandi pennacchi di polvere, costituiti da abbondanti materiali extraterrestri. Le nubi di polvere scura, sospinte da venti violenti, giravano vorticosamente attorno al globo per mesi prima di diventare stabili. Nel frattempo, un fortissimo attrito provocava fragori un po' dovunque e tempeste con lampi prodotti da scariche elettriche.

Quindi, 3900 milioni di anni or sono, ebbe inizio l'Archeano, che sarebbe durato oltre 1300 milioni di anni e sarebbe stato testimone di ogni cosa, dall'origine della vita alla sua diffusione sotto forma di associazioni batteriche, costituite da morbide stuoie colorate, verdi e porpora, e da rigide cupole arrotondate. Gli immensi volumi di roccia, che 3 miliardi di anni dopo sarebbero diventati le masse terrestri delle Americhe, dell'Africa e dell'Eurasia, si spostavano per tutto il globo assumendo le insolite forme degli antichi continenti. I continenti attuali apparvero nelle loro posizioni soltanto nell'ultimo 0,1% dell'intera storia del nostro pianeta.

Il calore e la radioattività che ancora si sprigionavano nel nucleo della Terra sospingevano la lava in ebollizione attraverso fessure formatesi nella crosta da poco raffreddatasi. In buona parte, la lava conteneva ferro magnetico fuso, le cui

molecole si orientavano in direzione del polo magnetico terrestre quando la lava si consolidava in roccia. All'inizio degli anni Sessanta, studi effettuati su questi antichi orientamenti magnetici confermarono ciò che precedenti osservatori avevano rilevato dalle forme dei continenti e dalla corrispondenza tra strati di roccia e fossili di animali selvatici ai loro margini: le diverse "zolle" in cui è spaccata la crosta terrestre si spostano sul mantello fuso, separandosi da alcune e urtando contro altre nel movimento. Alla velocità variabile da alcuni millimetri ad alcuni centimetri l'anno, una zolla continentale può percorrere, in un milione di anni, centinaia di chilometri. Per esempio, 200 milioni di anni or sono l'India era attaccata all'Antartide, lontana dal resto dell'Asia. Spostandosi di quasi cinque centimetri l'anno, si portò verso nord di oltre 6000 chilometri, unendosi al continente asiatico solo 60 milioni di anni or sono circa.

Le giunzioni tra le varie zolle sono sede di un'attività impetuosa. Dove le zolle si separano e il magma sale dal profondo per colmare le spaccature che si allargano, si creano nuove terre o fondali oceanici. Dove si scontrano, invece, si verificano terremoti e si formano vulcani in quantità e la terra si solleva formando montagne. Lo scontro lento, ma violento, tra le zolle indiana e asiatica ha fatto del monte Everest e della catena dell'Himalaya la vetta del mondo.

Oggi i terremoti e le scosse sussultorie lungo la faglia di San Andreas, in California, segnalano l'inesorabile procedere dell'enorme zolla del Pacifico, che si sposta verso nordovest quando si scontra con un'altra zolla, che si muove, invece, verso nord e da cui si erge il continente nordamericano. Nell'Africa settentrionale, il percorso del fiume Zambesi, in Mozambico, segue una spaccatura nella crosta terrestre, il grande rift, che sta scindendo il continente africano. A sud, enormi quantità di acqua riempiono le fenditure non appena si formano; pertanto grandi volumi di roccia franano. Al nord, ad Afar, in Etiopia, l'acqua non ha ancora cancellato il paesaggio. La roccia fusa fluisce lentamente verso la superficie e si solidifica dando origine a "basalti a cuscino", che formano il fondale di un nuovo oceano panafricano. Il fondale di que-

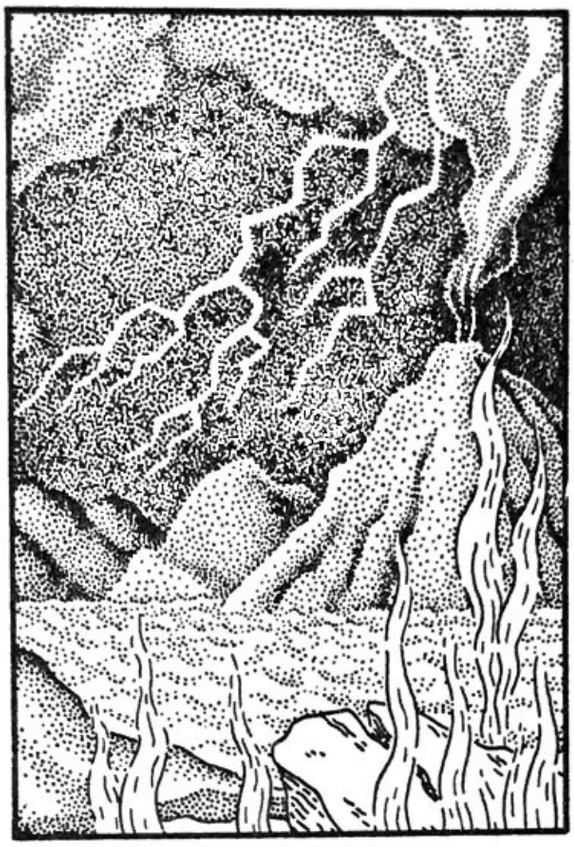
st'oceano futuro è ancora in gran parte asciutto e la visione panoramica della valle di Afar è quello che si avrebbe se l'acqua dell'oceano Atlantico evaporasse e si potesse osservare la formazione del fondale lungo una zona di frattura.

La faglia di San Andreas, la valle tettonica (rift) africana, la dorsale medio-atlantica, la dorsale est-pacifica e le isole vulcaniche Hawaii sono siti rari di attività geomorfologica su un pianeta oggi in gran parte tranquillo. Ma, durante l'Archeano, la superficie terrestre fu turbata da questi fenomeni tettonici. Enormi quantità di vapore fuoriuscirono da specie di sfiatatoi e dai bordi di fratture. La Terra appariva ricoperta da una coltre scura di gas carbonici e di fumi solforosi. Essa veniva anche bombardata da piogge di comete e da meteoriti carbonacee, che si infiammavano attraversando l'atmosfera fino a giungere alla debole e instabile superficie terrestre, la cui crosta era ulteriormente fratturata. Il carbonio e l'acqua giungevano assieme a questi corpi celesti dallo spazio, in quantità sufficiente ad arricchire le riserve proprie della Terra, riserve che sarebbero diventate in seguito la materia prima principale della vita.

A mano a mano che la superficie terrestre si raffreddava, le nubi di vapore che saturavano l'atmosfera finivano per condensarsi. Piogge torrenziali caddero al suolo senza interruzione forse per un centinaio di migliaia di anni, formando oceani caldi, poco profondi. I margini delle zolle sommerse, ricchi di sostanze chimiche e di energia, continuarono costantemente a scaricare gas ricchi di idrogeno nei mari. L'acqua che batteva sulla lava incandescente nelle fratture e nei vulcani evaporava, si condensava e di nuovo precipitava sotto forma di pioggia. Il paesaggio roccioso cominciò a essere eroso dalle acque, che ne lisciavano la superficie, facendo scomparire le butterature e le fratture prodotte su di essa dalla costante eruzione dei vulcani e dall'impatto violento delle meteoriti. Le acque smussavano i profili delle montagne, a mano a mano che queste si formavano, asportando minerali e sali che riversavano nei mari e nelle acque interne. Nel frattempo, nel corso di un avvenimento talvolta chiamato la Grande Eruzione, l'attività tettonica liberò i gas trattenuti all'interno della Terra, formando un'atmosfera

costituita da vapor acqueo, azoto, argo, neo e biossido di carbonio. Ormai buona parte dell'ammoniaca, del metano e di altri gas ricchi di idrogeno, contenuti nell'atmosfera primitiva, era stata dispersa nello spazio e la nuova densa atmosfera veniva colpita dai fulmini. Il Sole continuava a irradiarla di calore e di raggi ultravioletti, mentre il pianeta ruotava velocemente in cicli di giorni e di notti, entrambi di cinque ore. Anche la Luna si era formata dalla nube solare per condensazione. Il nostro fedele satellite naturale, piuttosto grande per un pianeta interno gracile come la Terra, ha esercitato fin dall'inizio un'attrazione ritmica sulle grandi raccolte d'acqua di quest'ultima, creando le maree.

Proprio da questo Archeano, che si estese da 3900 a 2500 anni or sono, provengono le prime tracce di vita che abbiamo trovato.



Capitolo 2

L'animazione della materia

Poche domande hanno un sapore così magico come quelle sull'origine della vita. Gli scienziati, sempre allerta per poter avvistare un qualsiasi indizio, hanno finito con l'accumulare una massa significativa di dati. Un nuovo mondo sommerso, che ha attinenza con le nostre ipotesi sulle origini, fu scoperto nel 1973. L'oceanografo Jack Corliss, docente presso la Oregon State University, vide per la prima volta le fratture di una zolla continentale sottomarina, in cui magma, vapore e gas si mescolavano ancora con l'acqua di mare, così come avevano fatto dappertutto nell'Archeano. Tranne che per un pesce abissale occasionale e per le tenaci pellicole di microrganismi estremamente resistenti, il fondo freddo (4 °C) e nero come la pece dell'oceano attuale è quasi dovunque disabitato. Invece, lungo le linee di giunzione delle grandi zolle terrestri, dove l'acido solfidrico si sprigiona dal mantello incadescente sottostante, sono presenti comunità acquatiche peculiari. In siti del genere, all'equatore, vicino alle Galapagos, al largo delle coste della Bassa California in Messico e a 3400 metri al di sotto del livello del mare nel Golfo del Messico, a poche ore di navigazione verso ovest partendo da St. Petersburg, in Florida, gli oceanografi hanno trovato anellidi giganti rossi, tubicoli, appartenenti al genere *Riftia*. Così chiamati perché sono sempre stati localizzati soltanto in corrispondenza delle fosse tettoniche, o *rift*, questi animali sono distribuiti attorno alle fratture e alle fenditure, e così pure vari pesci, patelle giganti, altri vermi e

un polpo che compare saltuariamente. Non comprendono specie che si nutrano di alimenti vegetali, perché le piante pluricellulari, le alghe e qualunque forma di vita dotata di attività fotosintetica hanno bisogno di luce, ma questa non penetra fino al fondo degli oceani. Gli animali che vivono in una fossa tettonica si nutrono, dunque, di colonie filamentose di batteri, che ricavano l'energia dall'acido solfidrico e da altri gas a elevato contenuto di idrogeno, che fuoriescono da sorgenti calde sui fondali.

I composti chimici di cui è costituita tutta la materia vivente, compresi noi stessi, sono composti del carbonio ridotto, in cui gli atomi di carbonio sono circondati da atomi di idrogeno. Jack Corliss ritiene che, con tutta probabilità, la vita abbia avuto inizio in corrispondenza degli antichi margini delle zolle, nelle acque calde e poco profonde che ricoprivano la Terra nell'Archeano: qui i gas ad alto contenuto di idrogeno, che emanavano dall'interno del pianeta, reagivano con i gas ad alto contenuto di carbonio dell'atmosfera. (Si valuta, in effetti, che il 90% del carbonio che costituisce la nostra massa corporea sia passato in un tempo o nell'altro attraverso le fenditure tra le zolle e gli sbocchi delle sorgenti calde.)

La versatilità del carbonio è uno dei segreti della vita sulla Terra. Gli atomi di carbonio, nello stato di grande agitazione in cui vennero a trovarsi nelle condizioni di calore, umidità e fusione che predominavano nell'Archeano, poterono combinarsi rapidamente con l'idrogeno, l'azoto, l'ossigeno, il fosforo e lo zolfo, dando così origine a una vasta gamma di sostanze diverse. Questo insieme di molecole contenenti carbonio continua a esistere, a interagire e a evolversi. I sei elementi che sono stati appena menzionati sono oggi il denominatore comune chimico di tutti gli esseri viventi e rappresentano il 99% in peso secco di ogni organismo. Inoltre, la percentuale di ciascuno di essi, la proporzione degli amminoacidi e dei componenti genetici rispetto al totale, e la distribuzione nelle cellule delle macromolecole lunghe, siano esse proteine o DNA, sono simili in tutte le forme di vita, dai batteri alla specie umana.[6] Queste rassomiglianze chimiche, come quelle essenziali tra l'uomo e le scimmie che Darwin aveva riconosciuto, mettono in rilievo l'e-

sistenza di un antenato comune a tutti gli esseri viventi e, inoltre, i vari tipi di condizioni che dovettero instaurarsi sulla Terra primitiva, quando la differenza tra cellule viventi e ambiente circostante, dal punto di vista chimico, era irrisoria.

Nel 1953, una famosa serie di esperimenti, realizzata all'Università di Chicago, diede l'avvio a un nuovo campo di indagini nelle scienze sperimentali, variamente definito "chimica prebiotica", "esperimenti su un modello di Terra primitiva" o "evoluzione chimica sperimentale". Stanley L. Miller, che stava preparando la tesi di laurea con Harold C. Urey, un chimico al quale era stato assegnato il premio Nobel, bombardò per una settimana un modello di atmosfera primitiva (un miscuglio di ammoniaca, vapor acqueo, idrogeno e metano) con una scarica elettrica simile a un lampo. Ottenne così due amminoacidi, l'alanina e la glicina, e molte altre sostanze organiche, che erano state ritenute, prima di allora, prodotti esclusivi delle cellule viventi. (Gli amminoacidi, piccole molecole con meno di una dozzina di atomi di carbonio, azoto, idrogeno e ossigeno, sono le unità costitutive di tutte le proteine.)

A partire dagli esperimenti di Miller-Urey, quasi tutti i componenti semplici delle molecole complesse sono stati prodotti in laboratorio, sottoponendo vari miscugli di gas semplici e di soluzioni minerali a differenti fonti di energia (una scintilla elettrica, una scarica elettrica silenziosa, una radiazione ultravioletta e un'emissione di calore). Un dato piuttosto soddisfacente è che le sostanze che si formano più facilmente sono i quattro amminoacidi presenti nelle proteine di tutti gli organismi in maggiore quantità. In questo genere di esperimenti si possono formare anche l'adenosintrifosfato, un composto indispensabile che costituisce una riserva di energia all'interno delle cellule, e altri trifosfati precursori di nucleotidi (unità strutturali dei geni). In alcuni degli studi più recenti, tutte e cinque le componenti nucleotidiche del DNA e del suo partner, l'RNA, (adenina, citosina, guanina, timina e uracile) poterono essere trovate in miscuglio dopo che il metano, l'azoto e l'idrogeno allo stato gassoso e il vapor acqueo erano stati bombardati da scariche elettriche. L'RNA (acido ribonucleico)

è, come il DNA, una molecola lunga, necessaria per l'attività funzionale e la riproduzione di ogni singola cellula di ogni essere vivente. Anch'esso è latore di informazione e consta di basi nucleotidiche, di residui di uno zucchero e di acido fosforico, tutte molecole che potrebbero essersi formate per irradiazione solare nell'Adeano.

Alla stessa stregua dell'ambiente terrestre primitivo, questi miscugli sperimentali forniscono ogni genere di composti organici ricchi di significato, la cui identità e probabile funzione sono spesso misteriose per i ricercatori umani, mentre non lo sono affatto per microbi del tutto casuali. I composti chimici estremamente complessi, sintetizzati in laboratorio, vengono rapidamente e avidamente divorati dai moderni funghi e batteri trasportati dall'aria, se non sono protetti in condizioni sterili. I microbi, che si trovano praticamente dovunque, non hanno che da calarsi sulla superficie dell'acqua per potersi velocemente sfamare.

Finora nessuna cellula è sfuggita da una provetta, ma Leslie Orgel, un chimico del Salk Institute, ha scoperto di recente una molecola simile al DNA, comprendente 50 nucleotidi: essa deve essersi formata spontaneamente da composti semplici del carbonio e da sali di piombo, in totale assenza di cellule viventi o di composti complessi. A Gottinga, nella Germania occidentale, Manfred Eigen e collaboratori hanno sintetizzato corte molecole di RNA che si sono autoduplicate in totale assenza di cellule viventi. Il compianto Sol Spiegelman e Donald Mills, suo collega alla Columbia University, sono riusciti a sintetizzare in provetta virus infettivi della varietà a RNA, interamente in grado di autoduplicarsi senza interruzione all'interno di cellule batteriche ospiti. (Incapaci di sintetizzare tutti i componenti necessari per essere un sistema vivente effettivo, i virus sono poco più di un semplice filamento di DNA o RNA, rivestito di proteina.) Spiegelman, pur utilizzando soltanto un enzima (una sostanza biochimica riutilizzabile, che accelera le reazioni chimiche), un acido nucleico (in questo caso l'RNA) e quelle piccole molecole che fungono da precursori degli acidi nucleici e che sono i nucleotidi, si è servito di una forma di energia che non esisteva sulla Terra primitiva: lo sforzo umano e i dollari.

Esperimenti come questi hanno diffuso, sia tra gli scienziati sia nell'uomo della strada, la convinzione che uno o comunque pochi fulmini, colpendo il ricco "brodo" chimico dei mari dell'Archeano, abbia determinato la fusione degli atomi di carbonio e di idrogeno con altri elementi nelle combinazioni idonee a produrre la vita. Idea comune è che la vita sia apparsa improvvisamente e quasi istantaneamente dal brodo prebiotico. Altri scienziati sostengono che le probabilità che ciò avvenga sono praticamente nulle, inferiori a quelle per cui un uragano, investendo una massa di rottami, riuscirebbe a montare un Boeing 707. Ma non esiste alcun modo credibile per stabilire con quale probabilità si possa verificare la generazione spontanea della vita dalla non vita. Come esperto di origini della vita, Leslie Orgel celiava: «Non sappiamo neppure, con un ordine di grandezza di uno su 10^{20}, se vi siano altri brodi in grado di dare origine alla vita». Tutto ciò che sappiamo è che la vita ebbe un inizio. Alcuni teorici si sentono costretti a postulare che la Terra sia stata inseminata da meteoriti che portavano con sé, già pronte, le molecole della vita. Essi mettono in rilievo il fatto che, nelle meteoriti, sono stati trovati i cinque diversi tipi di nucleotidi assieme a numerosi amminoacidi.

Ma le conclusioni sia sulla comparsa "istantanea" della vita sia sull'origine della vita "dalle meteoriti" deviano dal punto cruciale: che la Terra primitiva era l'ambiente adatto per il lento svilupparsi della vita primordiale dalla non vita. C'erano tempo ed energia sufficienti perché da alleanze chimiche, incoraggiate dall'ambiente soggetto a mutamenti ciclici e carico di energia, derivassero combinazioni molecolari proprie della vita. Le sostanze chimiche, inoltre, non si combinano a caso, ma in modi ordinati, secondo determinati schemi. Non vi è alcuna necessità di postulare l'improbabile quando abbondano le prove in favore del probabile. La presenza di composti organici nelle meteoriti sembra solo confermare che un ambiente in cui abbondi l'idrogeno, in presenza di energia e di carbonio, condizioni che certamente esistevano nel nostro sistema solare, se non nell'universo, produrrà, in base alle leggi della chimica, le unità costruttive della vita. Sono solo le molte altre qualità peculiari della Terra, fra cui l'umidità, le temperature miti e le

proprietà gravitazionali, a rendere il pianeta un ambiente migliore per queste molecole rispetto ad altri pianeti. Le condizioni sulla Terra hanno favorito certe combinazioni chimiche più di altre e, con il tempo, ha finito per prevalere un certo orientamento.

Sulla Terra primitiva, gli stagni, i laghi e i mari caldi e poco profondi, sottoposti a un'alternanza ciclica di caldo e di freddo, di luce ultravioletta e di buio, di evaporazione e di pioggia, contenevano gli ingredienti chimici in tutta la gamma degli stati energetici. Combinazioni di molecole si formavano, si decomponevano e si riformavano, essendo i legami tra le singole molecole forgiati di continuo dal costante apporto energetico della luce solare. Si formarono anche catene molecolari più complesse, rimanendo intatte per periodi più lunghi, allorché i vari microambienti terrestri si consolidarono in stati più stabili. Per esempio, l'acido cianidrico (HCN), formatosi nello spazio interstellare e mortale veleno per gli organismi moderni che hanno bisogno di ossigeno per la respirazione, unendosi con se stesso per ben cinque volte, diventò l'adenina ($H_5C_5N_5$), la principale componente di uno dei nucleotidi universali che costituiscono il DNA, l'RNA e l'ATP.

Senza ossigeno nell'atmosfera con cui reagire, e che li avrebbe distrutti, gli amminoacidi, i nucleotidi e gli zuccheri semplici poterono formarsi e rimanere assieme in soluzione. Perfino l'ATP, una molecola utilizzata senza eccezione, come trasportatore di energia, da tutte le cellule viventi, derivò dall'unione dell'adenina con il ribosio (uno zucchero con cinque atomi di carbonio) e con tre gruppi fosfato.

Alcune molecole divennero catalizzatori: facilitavano e accelerarano l'unione o la scissione di altre molecole senza rimanere esse stesse distrutte. I catalizzatori erano importanti prima della vita, perché lottavano contro il disordine per produrre, nei processi chimici, ordine e struttura. Gradatamente, i catalizzatori e le reazioni che essi facilitavano proliferarono più di ogni altra combinazione. Anche se sempre più complessi, ebbero un potere duraturo e rimasero nelle acque della Terra primitiva. Oggi, certi gruppi di molecole possono autocatalizzare

una serie di reazioni sorprendentemente intricate e ordinate, o cicliche, e ciascun cambiamento può produrne un altro nella catena molecolare. Di queste reazioni autocatalitiche "morte", alcune danno luogo a configurazioni, la cui crescente complessità nel tempo evoca la vita.

Sia da calcoli teorici sia da prove ottenute in laboratorio si è ricavata l'impressione che un'interazione tra due o più cicli autocatalitici possa aver prodotto un "iperciclo". Alcuni scienziati teorizzano che i catalizzatori coinvolti devono essere entrati "in competizione" per determinati elementi, presenti nell'ambiente, limitando, così, automaticamente la propria esistenza. Ma l'idea di fondo dell'iperciclo è l'opposto. Lungi dal distruggersi reciprocamente in una lotta per la sopravvivenza chimica, i composti in grado di autoorganizzarsi si sono completati l'uno con l'altro nel produrre strutture di tipo vivente, capaci in ultima analisi di replicarsi. Questi processi ciclici hanno formato la base non solo delle prime cellule, ma di tutte le miriadi di strutture basate sulle cellule e sui loro prodotti. I processi ciclici sono molto importanti per la vita. Permettono alla vita di conservare gli elementi chiave del suo passato, malgrado le fluttuazioni e la tendenza verso il disordine dell'ambiente più vasto.

Quanto più protette e concentrate erano le sostanze chimiche, tanto più lunghe e complesse e autorinforzantisi potevano diventare le loro attività. Alcune potevano essere protette all'interno di bolle, o trattenute sulle superfici regolari di argille e cristalli. Gli esperimenti che la natura compì nell'Archeano con le lunghe catene degli idrocarburi produssero composti che potevano incapsulare una gocciolina del liquido ambiente, il cui contenuto permetteva a ulteriori sostanze chimiche di avere libero accesso all'interno di tale recinzione o di sfuggire all'esterno. La recinzione era una membrana semipermeabile, una specie di morbida barriera, che permetteva l'ingresso di alcune sostanze, mentre proibiva l'accesso ad altre. Varie componenti chimiche si riunirono per formare le membrane e queste, nel grande impegno di produrre in ogni caso la vita, costituirono un esempio meraviglioso di semplicità. In effetti, gli eventi che condussero alla loro formazione furono riprodotti

in laboratorio in condizioni cicliche di temperatura, di acidità, di umidità e di evaporazione, che sono comuni sulla Terra.

Una catena idrocarburica, legata a un gruppo di atomi di fosforo e di ossigeno, presenta una carica elettrica all'estremità che porta il gruppo fosfato e nessuna carica, invece, all'altra estremità. Il composto nel suo insieme attrae acqua all'estremità dotata di carica e la respinge all'estremità senza carica. Molecole di questo tipo, dette fosfolipidi, tendono ad allinearsi l'una a fianco dell'altra, con le estremità non dotate di carica elettrica il più lontano possibile dall'acqua e quelle dotate di carica elettrica dirette verso di essa. (Il fenomeno è essenzialmente quello che si osserva quando una goccia d'olio è messa a contatto con l'acqua, sulla quale forma una pellicola.) Lipidi di questo e di altri tipi tendono spontaneamente a ripiegarsi, formando gocce che isolano i materiali all'interno da quelli all'esterno. È stato anche dimostrato che formano doppi strati quando movimenti a onda mettono a contatto due superfici acquose, rivestite di pellicole di lipidi. Se ciò accade, le estremità della lamina di molecole lipidiche, dotate di carica elettrica, puntano l'una verso l'altra e vengono così a trovarsi come dentro a un sandwich, tra le estremità prive di carica. In questo modo si formarono le prime membrane, le prime barriere semipermeabili tra "interno" ed "esterno", la prima distinzione tra sé e non sé.

Le membrane degli organismi attuali sono composte da molti differenti tipi di lipidi, proteine e carboidrati, le cui funzioni sono così complesse e calibrate con tale precisione che siamo ben lungi dal poterle interamente capire tutte. Ma la prima membrana fosfolipidica, diversamente dalle varie altre strutture incapsulanti che si possono anch'esse formare nel crogiuolo della natura, poté, in virtù esclusivamente delle proprie caratteristiche chimiche, concentrare una soluzione di altri composti del carbonio. Poté tenere in stretta prossimità componenti in grado potenzialmente di interagire, permettendo alle "sostanze nutritive" di entrare e impedendo, invece, all'acqua di sfuggire. La membrana rese possibile l'esistenza di quell'unità ben distinta del microcosmo che è la cellula batterica. La maggior parte degli scienziati ritiene che i lipidi si siano

combinati con le proteine, producendo quegli aggregati traslucidi di materiale simile alla materia vivente, che precedettero l'avvento della vita stessa. Non è nota alcuna forma di vita in assenza di un tipo o l'altro di membrana.

Ma tra i miscugli estremamente complessi dello scienziato in laboratorio e la più semplice cellula in grado di vivere vi è ancora un anello mancante: il salto tra le piccole sostanze organiche, quali sono gli amminoacidi e i nucleotidi, e le più grosse sostanze biochimiche, quali sono l'RNA e le proteine, è enorme. Un arco di tempo di anche solo alcune centinaia di milioni di anni, in cui si sia svolta un'attività molecolare, è lungo, molto lungo. Per predisporre le condizioni che avrebbero condotto alle origini della vita in laboratorio, l'impegno degli scienziati si è protratto solo per alcuni decenni e, già così, sono andati molto lontano. Non è dunque inconcepibile che, prima della fine del XX secolo, una cellula vivente possa generarsi spontaneamente in laboratorio. Per un arco di tempo di milioni di anni, dunque, le probabilità di una formazione spontanea di ipercicli furono enormemente superiori a quelle che possono avere oggi i ricercatori, i quali, se vogliono ricreare la vita, devono sostituire la programmazione alla cieca perseveranza del tempo.

Probabilmente non una sola volta, ma parecchie volte, gli amminoacidi, i nucleotidi, gli zuccheri semplici, i fosfati e i loro derivati si sono formati e sono diventati più complessi per effetto dell'energia solare, ben protetti all'interno di una bolla lipidica e assorbendo dall'esterno, come se fossero "alimenti", ATP e altri composti del carbonio e dell'azoto. Strutture piuttosto complesse si sono formate spontaneamente, in laboratorio, da miscugli lipidici. Per esempio, David Deamer, all'Università della California a Davis, ha osservato che, se gli ingredienti giusti sono mescolati in condizioni appropriate, alcuni nucleotidi sono catturati e circondati da sfere costituite da molecole lipidiche. Queste sfere lipidiche si scindono in due, dapprima semplicemente per effetto della tensione superficiale, dato che ciascuna metà svolge una propria attività interna. In seguito, le molecole catalizzatrici, presenti all'interno delle membrane lipidiche, potrebbero aver cominciato a mantenere

attivamente queste ultime. Forse quando, nella minuscola nicchia locale, si fu esaurita la riserva dei componenti a disposizione, le protocellule cominciarono a rompersi, scomparendo, mentre nuove se ne formarono in qualche altra pozza di marea, ciascuna con un *modus operandi* leggermente diverso.

Per essere viva, un'entità deve essere *autopoietica*, cioè deve mantenersi attivamente contro i guai prodotti dall'ambiente. La vita reagisce a una perturbazione, ricorrendo a materia ed energia per conservarsi intatta. Un organismo scambia costantemente le proprie parti, sostituendo le sostanze chimiche che lo compongono senza mai perdere d'identità. Questo fenomeno modulante, "olistico", di autopoiesi, di automantenimento attivo, è il fondamento di tutta la vita conosciuta. Tutte le cellule reagiscono alle azioni di disturbo che provengono dall'esterno per conservare, entro i loro limiti, gli aspetti chiave della loro identità. Se le minacce esterne sono grandi, i processi ciclici normali si alterano e può conseguirne una schismogenesi. *Schismogenesi* è un termine coniato dal biologo e filosofo Gregory Bateson e si riferisce a cicli che, nei sistemi viventi, oscillano in modo incontrollabile. Bateson pensava che la schizofrenia potesse essere fatta risalire a un particolare tipo di schismogenesi, in tal caso a un eccesso di retroazione nel cervello, che conduce a una disintegrazione della mente. Ma questo è solo un esempio estremamente specifico di mancanza di processi ciclici normali. In organismi come le piante e gli animali, riconosciamo l'autopoiesi generalmente come "salute". La schismogenesi è l'opposto. Ma anche i predecessori delle cellule devono aver avuto una qualche forma di autopoiesi, cioè di capacità di conservare la propria integrità biochimica e strutturale di fronte alle minacce dell'ambiente.

Una volta in grado di rimanere se stessa, una struttura che stia per diventare vivente deve riprodursi. Prima delle cellule, la vita e la non vita potevano anche non essere distinguibili. I primi sistemi di tipo cellulare furono quelli che il premio Nobel belga, il fisico Ilya Prigogine, ha definito "strutture dissipative", oggetti o processi che si organizzano e modificano spontaneamente la loro forma. Con un apporto di energia, le strutture dissipative possono diventare più ordinate, invece di

meno. Il tipo di teoria dell'informazione che è stato così utile nella tecnologia della comunicazione si applica esclusivamente all'informazione che consta quasi interamente di conferme. Nelle strutture dissipative, l'informazione comincia a organizzare se stessa; sorgono allora isole di elaborazione.

Dalle strutture dissipative e dagli ipercicli è emersa la catena di nucleotidi, ribosio e fosfato che può sia replicarsi sia catalizzare le reazioni chimiche. Si tratta dell'acido ribonucleico, o RNA, la prima frase nel linguaggio della natura. Non ancora autopoietico, ma estremamente strutturato, il primo RNA, all'interno di sfere circondate da filamenti lipidici, si accumulò nelle acque calde, con abbondanti sostanze organiche, di una Terra che offriva condizioni favorevoli. Senza predatori e, al contrario, con molta energia a disposizione, si avviò subito un processo di complessificazione. Nell'Adeano, prima della comparsa della vita, presero piede sulla Terra due tendenze chimiche: il riferimento a sé e l'autocatalisi. Le sostanze chimiche reagirono ciclicamente, producendo versioni e variazioni di sé, che tendevano a creare un ambiente favorevole alla ripetizione delle reazioni originali. Le strutture autopoietiche portarono l'organizzazione un passo più avanti: si servirono dell'energia per mantenere se stesse in modo attivo e destinato ad avere successo di fronte alle gravi perturbazioni esterne. I loro limiti divennero distinti. Ciò conferì loro identità e memoria. Oggi, anche se tutte le sostanze chimiche presenti nel nostro corpo vengono sostituite continuamente, noi non cambiamo per questo il nostro nome o ci consideriamo diversi. La nostra organizzazione viene conservata, o meglio conserva se stessa. Dalle strutture dissipative agli ipercicli dell'RNA, ai sistemi autopoietici e ai primi esseri in grado di replicarsi in modo grossolano, cominciamo a vedere la via tortuosa che le strutture autoorganizzantisi hanno percorso lungo il tragitto che le ha condotte verso la cellula vivente.

Capitolo 3

Il linguaggio della natura

Secondo il *Libro del Genesi*, Dio fece interrompere la costruzione di una torre imponente a Shinar, introducendo tra gli esseri umani molte lingue. La Torre di Babele non raggiunse mai il cielo perché i suoi costruttori, privati della lingua con la quale riuscivano a comunicare tra loro, rimasero confusi. La parabola mostra l'importanza di un linguaggio universale. Mentre la gente si esprime ancora in molte lingue (però sempre in minor numero con il passare del tempo), il codice genetico, che consente la traduzione dei geni in proteine, è dovunque lo stesso.

Negli ultimi due decenni, l'aver compreso il linguaggio genetico, ormai divenuto universale, un linguaggio basato sull'RNA e sul DNA ed emerso dalla babele dei composti chimici dell'Archeano, ha reso la nuova scienza della biologia molecolare davvero elettrizzante. Il codice genetico è un fenomeno unico. La molecola del DNA, o dell'RNA, può duplicarsi in modo esatto, ma può anche causare l'uniforme assemblaggio di quelle altre sostanze chimiche a molecola lunga quali sono le proteine. Fu questa l'intuizione fondamentale, resa possibile dalla rivoluzione che avvenne nel campo della biologia molecolare, quando, nel 1953, James Watson e Francis Crick scoprirono la struttura del DNA.

Per quanto miracoloso tutto ciò possa sembrare, la duplicazione, basata su un rapporto tra molecole di uno a uno, è un processo chimico sorprendentemente semplice. La presenza di

una struttura chimica complementare determina la forma e le proprietà delle molecole che si duplicano: il DNA e l'RNA sono, per lunghezza, solo la metà di una singola macromolecola. Come i dentelli di una chiusura lampo, che si adattano l'uno all'altro, in presenza degli ingredienti giusti i componenti della metà che manca si allineano semplicemente a quelli dell'altra metà, adattandosi.

L'RNA è un tipo di emimolecola particolarmente versatile. Può combaciare con un'altra emimolecola di RNA lunga e simile a sé, oppure può combaciare con corti segmenti nucleotidici, che trasportano amminoacidi, producendo così tutte le proteine che conferiscono agli organismi le loro svariate forme e configurazioni. Componenti dell'RNA sono quattro diversi nucleotidi, costituiti dalle basi adenina, guanina, citosina e uracile, legate ciascuna a un gruppo fosfato (composto di fosforo e ossigeno) e a un residuo di ribosio, che è un tipo di zucchero. La sequenza dei nucleotidi, riuniti a gruppi di tre, in un particolare RNA può fungere da segnale perché un secondo RNA particolare, che combaci con il primo, si attacchi agli amminoacidi presenti nell'ambiente. Quando questi si legano tra loro, uno dopo l'altro, si forma una proteina, la quale può accelerare a sua volta un ulteriore appaiamento della molecola di RNA, aumentando così la produzione di quest'ultimo.

Le prime entità autopoietiche delimitate da membrana furono probabilmente sotto l'esclusivo controllo dell'RNA. Potevano duplicarsi producendo proteine, le quali davano origine a nuovo RNA. La produzione della molecola di DNA, molto più lunga e passibile di un minor numero di incidenti, ebbe inizio probabilmente più tardi e assunse gradatamente la funzione di uno stampo per la copiatura dell'RNA.

Anche il DNA consta di soli quattro nucleotidi, ciascuno legato con un residuo di zucchero e con un gruppo fosfato. Al posto dell'uracile dell'RNA, il DNA ha la timina, e al posto del ribosio il desossiribosio. I due filamenti di DNA, o di RNA, avvolti l'uno attorno all'altro si complementano reciprocamente: l'adenina si lega sempre con la timina e la guanina con la citosina, anche qui per merito della loro particolare struttura chimica. Il più piccolo tra i batteri ha centinaia di mi-

gliaia di queste parti appaiate, o coppie di basi; le cellule animali e vegetali molti milioni. Tutte le cellule attuali hanno sia il DNA sia l'RNA. L'allineamento dei nucleotidi porta all'allineamento delle proteine, il che porta a sua volta alla produzione di nuovi nucleotidi, anch'essi allineati in sequenza. Questo ordinamento spaziale di sostanze chimiche non è soltanto un fenomeno dispersivo e autopoietico, ma è anche il prolifico progenitore di ogni forma di vita sulla Terra.

Le proteine rendono un organismo esattamente quello che è. La loro composizione e la loro quantità sono specificate dall'allineamento dei nucleotidi e gli organismi differiscono in gran parte perché la sequenza nucleotidica lungo l'elica del loro DNA è diversa. Le variazioni nell'ordine e nel numero delle coppie di nucleotidi portano alla sintesi di proteine differenti e sono perlomeno diverse migliaia le proteine che si trovano in ogni cellula e che determinano l'aspetto di un organismo, il modo in cui esso si muove e il modo in cui svolge il proprio metabolismo. Le cellule hanno tutte bisogno di proteine per accelerare le reazioni chimiche; senza certe proteine, molte reazioni biologiche essenziali si svolgerebbero molto lentamente o addirittura si arresterebbero. Regnerebbero il caos e una chimica molto banale.

Il denominatore comune della vita è ancora più esteso. Bastano solo venti amminoacidi diversi, legati in catene costituite da alcune decine fino a diverse centinaia di unità, per dare luogo a tutte le proteine di tutti gli organismi noti, presenti sulla Terra. La sequenza degli amminoacidi, in primo luogo, determina la forma della proteina, e la forma determina la funzione. Il codice per tradurre la sequenza di nucleotidi nel DNA in una sequenza di amminoacidi in una proteina è quasi universale. In quasi tutti i casi, una data sequenza nucleotidica si tradurrà nella stessa sequenza amminoacidica.

In tutti gli organismi, ogni tripletta nucleotidica sul filamento codificante dell'acido nucleico (il "codone") specifica un amminoacido. Ma alcuni indizi suggeriscono che, forse, codoni di due nucleotidi soltanto abbiano costituito una versione precoce di questo sistema. Per esempio, in un codone, il terzo nucleotide è spesso ridondante: nel formare una tripletta

sull'RNA messaggero, l'uracile, l'adenina, la citosina e la guanina potrebbero essere, ciascuno, il terzo nucleotide dopo una doppietta citosina-guanina. In tutti e quattro questi casi, verrebbe specificato l'amminoacido arginina. Inoltre, il nucleotide al centro determina spesso il più semplice e il più comune di tutti gli amminoacidi. Il primo codice genetico fu senza dubbio più semplice di quello attuale, e meno attendibile. Lingua viva, il codice genetico porta ancora in sé la testimonianza delle sue radici etimologiche.

Come parole, inoltre, gli elementi del codice possono essere corrotti, ridistribuiti, modificati e trasmessi in una forma alterata. Le mutazioni sono variazioni ereditabili nella quantità o nella sequenza delle basi di DNA. Esse compaiono quando qualcosa nell'ambiente, per esempio una radiazione, o rompe un legame chimico o ne forgia uno fuori luogo; ne risulta un cambiamento nella sequenza di DNA ed esso conferisce nuove capacità o incapacità a svolgere determinate funzioni, viene copiato e trasmesso dalla cellula alle sue discendenti, oppure provoca il decesso della cellula stessa. Come la differenza di una singola lettera tra parole (per esempio melo e mulo), piccoli cambiamenti o aggiunte al codice provocano effetti sinergici.

Nel clima di eccitazione che si sviluppò in seguito alla scoperta del ruolo vitale del DNA e dell'RNA, responsabili della diversità della vita furono considerate per la maggior parte minime mutazioni a carico delle coppie di basi, comparse proprio in quelle molecole. Ma sembra che, a un tasso di mutazione stimato, per ogni generazione, di una sola mutazione, a livello di una coppia di basi, per un numero variabile da un milione a un miliardo di cellule riunite in gruppo, persino questo genere di mutazione sia inadeguato a spiegare la grande varietà che si rileva nella vita degli organismi.

Nel linguaggio, i cambiamenti più rapidi e significativi si attuano attraverso l'uso. L'argot e lo slang stretti, prodotti dall'uso a livello quotidiano, fondamentale, si infiltrano costantemente nel corso principale del linguaggio e, alla fine, giungono addirittura nei dizionari ufficiali. Come scopriremo nel prossimo capitolo, la "via" in cui il messaggio genetico subisce continui e rapidi cambiamenti è il microcosmo.

La lettura e la trascrizione del messaggio genetico può avvenire in un periodo di tempo incredibilmente breve. Nello spazio di secondi, o al massimo di minuti, comincia l'assemblaggio degli amminoacidi. Il DNA isolato non può duplicarsi, ma se viene posto in provetta assieme alle proteine (i catalizzatori), ai nucleotidi (l'alimento) e a una fonte di energia (l'energia chimica presente nei nucleotidi), in solo pochi secondi è in grado di produrre una copia di sé. Con grande vantaggio per la medicina futura, può persino farlo dopo essere stato congelato per anni in soluzioni contenute in fiale di vetro. Pur non essendo in grado, come lo sono gli organismi interi, di automantenersi, può tuttavia duplicarsi se l'ambiente chimico in cui si trova è confacente.

Nel 1977, Frederick Sanger e i suoi collaboratori, in un laboratorio di ricerca medica a Cambridge, in Inghilterra, hanno decifrato il primo messaggio genetico completo e hanno scoperto una nuova stravaganza nel linguaggio in cui quel messaggio era espresso. Il DNA di un virus, lo Φ X174, ha una lunghezza corrispondente a soli 5375 nucleotidi, che potrebbero servire a produrre approssimativamente 1792 amminoacidi, sufficienti per cinque proteine; in realtà esso codifica per nove differenti tipi di proteine, che richiedono circa 3200 amminoacidi. Il gruppo di Sanger ha scoperto che, utilizzando lo stesso DNA, un segmento di questa molecola può determinare più di una singola proteina, secondo il punto da cui comincia la lettura del messaggio. Ciò appare come una sbalorditiva "invenzione" molecolare. Eppure, se teniamo conto di nuovo che la vita cerca di mantenere la propria unità a tutti i costi, utilizzando messaggi nucleotidici per specificare le proteine, non sembra poi così improbabile che il codice genetico abbia prodotto doppi significati. In effetti, un singolo segmento di sequenza nucleotidica viene letto, in numerosi tipi di cellule e anche in qualche mitocondrio, con diversi significati. Nel linguaggio universale della vita esiste, dunque, una certa ambiguità.

Nello studio di animali e piante complessi, caratteri come i polmoni, o gli occhi, o i fiori, che richiedono l'interazione di molti fattori genetici per essere prodotti, sono chiamati *semi*.

Anche la vita primordiale si evolvette grazie a condizioni che favorirono non singoli caratteri (questo enzima o quella coppia di basi nucleotidiche), ma semi, catene di reazioni chimiche che produssero alimento, movimento o qualche altra caratteristica cruciale. Nei microbi, i semi furono tendenzialmente metabolici. Per esempio, i microbi che producevano i metaboliti di cui avevano bisogno partendo dall'anidride carbonica presente nell'aria soffrivano per mancanza di alimento molto meno spesso di quelli incapaci di sfruttare il carbonio dell'aria. Le fasi biochimiche che permettono l'utilizzazione dell'anidride carbonica atmosferica costituiscono un esempio di seme a livello microbico.

Sembra sciocco postulare un singolo momento drammatico, in cui un lampo magico abbia dato il via alla formazione spontanea, da parte del DNA e dell'RNA, di una cellula e, quindi, alla vita. Molte strutture dissipative, lunghe catene di reazioni chimiche diverse, devono essersi evolute, devono aver reagito e devono essere andate incontro a distruzione, prima che si sia formata e duplicata con elevata affidabilità l'elegante doppia elica del nostro antenato più remoto. In effetti, può darsi che forme di vita basate sulla duplicazione di tipi di molecole totalmente diverse abbiano avuto origine e si siano sviluppate per un certo periodo prima di scomparire definitivamente. Ma è chiaro che, essendo oggi il denominatore comune di tutte le forme di vita, le membrane lipidiche, che delimitano al loro interno il DNA e l'RNA, cominciarono a un certo punto ad affermarsi con successo. Il numero di queste minuscole sfere batteriche continuò ad aumentare e a diminuire in un processo di flusso e riflusso. Prendendo a prestito un'analogia di Julian Huxley, le onde si infrangono e si ritraggono su se stesse, mentre la marea continua a salire. A un certo punto, un poco prima di tre miliardi e mezzo di anni or sono, la marea evolutiva raggiunse il livello di vita che noi conosciamo oggi: la cellula delimitata da una membrana, contenente 5000 proteine, che riceve messaggi attraverso l'RNA ed è controllata dal DNA. Una volta che l'autopoiesi ne assicurò l'esistenza e la riproduzione ne garantì l'espansione, l'evoluzione si avviò. Il microcosmo, l'Era dei Batteri, aveva avuto inizio sulla Terra.

I minuscoli sacchetti appena descritti, contenenti DNA e RNA, svolsero prodigiosamente le loro attività nell'Archeano. Incessantemente, senza sapere che cosa fosse il riposo, essi crebbero, consumarono energia e sostanze organiche e si divisero. Sotto forma di colonie e filamenti, si intrecciarono e ricoprirono il globo sterile con una pellicola discontinua. Le dimensioni di questa si dilatarono in una patina vitale, la biosfera, sede in cui si svolge la vita. Oggi la biosfera circonda la Terra, da una profondità che è un poco superiore agli 8000 metri in mare a un'altitudine che supera i 9500 metri, sulla sommità di montagne che sono al livello superiore della bassa atmosfera, o troposfera. L'espansione dei batteri avvenne innanzitutto nell'acqua, che essi modificarono producendo gas. Proseguì, quindi, sulla superficie dei sedimenti, dove ancor oggi si trovano alcune loro specie. Nessun batterio visse, invece, l'intero arco della sua esistenza nell'atmosfera, così come non potrebbe farlo oggi alcun essere vivente. Cionondimeno, alcuni organismi possono trascorrere una parte del tempo nell'atmosfera, principalmente sotto forma di particelle quiescenti (per esempio, semi, spore e uova). Il biota, cioè il complesso di tutte le forme viventi sulla Terra, diventa impercettibile ai due estremi, cioè a parecchie migliaia di metri di profondità e ad altrettante di altitudine. Il cuore della vita sulla Terra, il fitto, pullulante centro del biota, era, ed è ancora, entro lo spessore della superficie del pianeta, che è di soli pochi metri. Sherwood Chang dell'Ames Research Center della NASA ha avanzato l'ipotesi che la vita possa aver avuto inizio all'interfacies tra superfici liquide, solide e gassose, dove esiste un flusso di energia e si possono facilmente formare strutture dissipative. La vita prospera ancora oggi dove l'acqua incontra la terra e l'aria. Il biota, cioè la somma di tutti i viventi, e in primo luogo il microbiota, la somma di tutti i microrganismi viventi, è antico e si estende in tutta la vastità della biosfera. Col tempo esso si è diffuso, eppure dal punto di vista delle innovazioni chimiche e metaboliche, non si è modificato, nella sua essenza, in maniera significativa. La patina planetaria, composta da tutti gli esseri che si riproducono, continua nel tempo, ha una propria vita. Mette in ciclo le sostanze inorganiche –

rocce, fanghi e gas – modulando e controllando se stessa. Collettivamente le cellule mantengono le condizioni di abbondanza d'acqua, di carbonio e di idrogeno, proprie delle loro origini. La biosfera conserva in sé gas come l'idrogeno e il metano che, altrimenti, sarebbero già andati perduti da tempo per effetto dei processi cosmici. Essa è un ricordo di se stessa.

In un certo senso, l'essenza della vita è una sorta di memoria, la conservazione fisica del passato nel presente. Riproducendosi, le forme di vita legano il passato e registrano messaggi per il futuro. I batteri che fanno a meno dell'ossigeno oggi ci raccontano com'era il mondo senza ossigeno nel quale comparvero per la prima volta. I pesci fossili ci parlano di raccolte d'acqua estese, che durarono ininterrottamente per centinaia di milioni di anni. I semi che hanno bisogno di temperature vicine al punto di congelamento per germinare ci ricordano inverni gelidi. I nostri stessi embrioni rappresentano fasi della storia animale nei diversi stadi di sviluppo.

Esprimendosi con altri termini, la vita è estremamente conservativa. A qualunque livello (singolo organismo, specie, biota nel suo insieme), essa consuma energia nel tentativo di conservare il proprio passato, anche se, paradossalmente, minacce che le provengono da varie parti la costringono a innovarsi. Poiché l'autopoiesi è un imperativo del biota nel suo complesso, la vita consumerà enormi quantità di energia per conservarsi. Essa cambierà proprio per rimanere sempre la stessa.

Vi sono pochi dubbi sul fatto che la patina planetaria, che comprende anche noi, sia autopoietica. Sembra che la vita alla superficie della Terra sia in grado di regolare se stessa di fronte alle perturbazioni esterne e lo fa senza riguardo per gli individui e le specie che la compongono. Più del 99,99% delle specie che sono esistite sul pianeta si è estinto, ma la patina planetaria, con la sua schiera di cellule, ha continuato a esistere per più di tre miliardi di anni. E la sua base, passata, presente e futura, è il microcosmo: milioni di miliardi di microbi che comunicano e che si evolvono. Il mondo visibile è una porzione del microcosmo arrivata tardi e cresciuta in eccesso. Esso funziona solo per l'ottima connessione che ha con le attività del microcosmo. Si pensa che, di per sé, i microbi abbiano mante-

nuto la temperatura media della Terra primitiva, così come era ospitale per la vita, malgrado il Sole "dell'inizio", molto più freddo, che gli astronomi ritengono fosse presente allora. Nell'Archeano, microbi "stupidi" continuarono a modificare la composizione chimica dell'atmosfera in modo che non diventasse proibitiva per la vita nel suo insieme. Sappiamo, dall'ininterrotta testimonianza fossile, che la temperatura e l'atmosfera del pianeta non distrussero mai tutta la vita. Escludendo un intervento divino e la fortuna, sembra che la vita in se stessa abbia sufficienti possibilità di promuovere le condizioni che ne hanno favorito la prolungata sopravvivenza di fronte alle avversità ambientali.

Comprendendo come meglio possiamo le formidabili capacità della biosfera in cui trascorriamo la nostra esistenza, difficilmente possiamo conservare l'illusione che, senza il nostro aiuto, la natura si trovi indifesa. Per quanto importanti possano sembrarci tutte le nostre attività, il ruolo che svolgiamo nell'evoluzione è transitorio e di poco valore di fronte alla ricchezza di quell'intreccio di esistenze che forma lo strato superficiale del pianeta. Possiamo inquinare l'aria e le acque a danno dei nostri nipoti e accelerando la nostra estinzione, ma ciò non eserciterà alcun effetto sulla continuazione del microcosmo. I nostri corpi sono costituiti da 10 quadrilioni di cellule animali e da altri *100 quadrilioni* (1000000000000000) di cellule batteriche. Non abbiamo "nemici" naturali che ci divorino. Ma, dopo la morte, ritorniamo al nostro dimenticato suolo calpestato. Le forme di vita che riciclano le sostanze dei nostri corpi sono primariamente batteri. Il microcosmo sta ancora evolvendo attorno a noi e in noi. Si potrebbe dire, come vedremo, che il microcosmo si sta evolvendo *come* noi.

Capitolo 4

L'ingresso nel microcosmo

Nel 1977, alla periferia di una minuscola cittadina di montagna di nome Fig Tree, in Sudafrica, un paleontologo dell'Università di Harvard, Elso S. Barghoorn, staccava dal pendio di una montagna ormai sfruttata, nella regione della Barbeton Mountain, frammenti di roccia simili a selce e raccoglieva i campioni. Di ritorno a Cambridge, nel Massachusetts, sezionò quei frammenti in lamine così sottili che potevano essere attraversate dalla luce e li analizzò al microscopio.

L'acqua, contenente abbondanti minerali provenienti dai vicini vulcani, aveva formato quella selce nera. Per esperienza, Barghoorn sapeva che proprio quel tipo di roccia aveva le maggiori probabilità di contenere fossili. Più di tre miliardi di anni prima, in quel luogo, lava contenente abbondante silice si era riversata in un denso fango nero, indurendosi e dando origine alla selce. Senza sosta i vulcani proiettavano ceneri nell'aria e queste ceneri cadevano poi in mucchi immensi sul fango e nell'acqua di un mare, il mare dello Swaziland oggi scomparso, che per milioni di anni aveva ricoperto la maggior parte di quell'area che è oggi l'Africa meridionale. Anni di vulcanismo e di erosione, di trasporto di pietrisco e di ciottoli, non fecero altro che ammonticchiare strati di rocce numerosi e complessi. Per lunghi periodi di tempo, questi strati ricoprirono le rive e tappezzarono il fondo dell'antico mare. Oggi, le testimonianze di quello scenario del passato si estendono come colli e prominenze rocciose per centinaia di chilometri, sia in Sudafrica sia

nello Swaziland. In alcune località, gli strati complessi delle rocce dello Swaziland hanno uno spessore che supera i quindici chilometri.

La zona di Swartkoppie, in questo oceano fossile, è intersecata da filoni di depositi carboniosi, simili a carbon fossile, che hanno uno spessore di diverse centinaia di metri e che potrebbero essere confusi per resti di alberi di una palude tropicale, di pteridosperme e di licopodi, come quelli che hanno prodotto depositi di carbone in Pennsylvania, 300 milioni di anni or sono. Questi depositi, contenenti abbondante carbonio, hanno sempre indicato la presenza in passato di una attività fotosintetica. Ma le rocce dello Swaziland si depositarono 3,4 miliardi di anni or sono, cioè hanno un'età che è più di dieci volte superiore a quella delle foreste paludose. (Le primissime piante fossili terrestri risalgono a circa 400 milioni di anni or sono.)

Barghoorn andava cercando appunto l'antica vita. Dopo aver lungamente studiato le sottili sezioni delle selci africane in collaborazione con i suoi allievi, scoprì in esse centinaia di oggetti rotondeggianti, la maggior parte dei quali era costituita da semplici sfere. Ma la sua attenzione fu anche attratta da una o due forme a manubrio. Era vita anche questa, e colta proprio nell'atto di dividersi? In altri campioni di roccia della vicina Kromberg Formation, vennero trovati sottili filamenti microscopici, simili ai cianobatteri (o alghe azzurre) attuali. Erano tutti questi i più antichi fossili del pianeta: una prova che i batteri, già esperti nella fotosintesi, prosperavano sulla Terra a soli 500 milioni di anni dalla formazione delle prime rocce.[7]

La scoperta effettuata da Barghoorn in Sudafrica era il frutto di una ricerca consapevole. Più di vent'anni prima, all'Università del Wisconsin, il geologo Stanley Tyler gli aveva mostrato alcune rocce prelevate sulle sponde settentrionali del Lago Superiore. Quei campioni, che risalivano a 2 miliardi di anni or sono, erano zeppi di strani oggetti che Barghoorn aveva pensato fossero fossili di vita microscopica. Fin dal 1954, dunque, Barghoorn stava in guardia, alla ricerca di tracce di vita primitiva. La sua ostinata perseveranza a cercare i fossili più

antichi in rocce dall'aspetto normale portò a una vera e propria esplosione di ricerche sui microfossili, che durò per una trentina d'anni ed è tuttora in corso.

Fino agli anni Cinquanta si credette che la vita fosse cominciata poco prima di 570 milioni di anni or sono, dato che, nelle rocce di quell'epoca, su tutta la Terra, compare all'improvviso un'enorme quantità di animali fossili dal rivestimento rigido, che viene citata spesso come "esplosione del Cambriano". In rocce più antiche non erano mai stati trovati esempi chiari di animali fossili con scheletro. Alcuni scienziati, dimenticando il fatto che animali più semplici, dal corpo molle, avrebbero potuto non conservarsi, avevano ipotizzato una comparsa piuttosto improvvisa non solo di tutti gli animali, ma della vita stessa.

È risultato che le rocce dell'Inghilterra e del Galles, che contenevano alcuni dei primi depositi di animali fossili meglio studiati, erano prive degli strati corrispondenti al tardo pre-Cambriano. Quando in Cina, nell'Australia meridionale, in Siberia e in altre località furono trovate formazioni rocciose continue, queste rivelarono molte eccellenti impressioni su arenaria di animali marini dal corpo molle, ben riconoscibili. In epoca più recente, il pre-Cambriano è stato accuratamente setacciato da Barghoorn e da altri e ha rivelato la presenza di fossili non comuni e nuove testimonianze hanno spostato ancora più indietro l'origine della vita sulla Terra.

Non tutte le prove valide concernenti la vita primitiva si trovano nei corpi fossilizzati degli organismi del passato. Nella formazione nota con il nome di Isua Formation, nel Labrador orientale e nella parte sudoccidentale della Groenlandia, ai margini della calotta polare, si trovano le rocce sedimentarie più antiche di tutta la Terra. Esse potrebbero essere il luogo di sepoltura dei batteri dell'Archeano, che formarono colonie prospere ed appariscenti sotto forma di pellicole superficiali e di schiume. Con un'età di quasi 4 miliardi di anni (3, 8 per la precisione), esse furono soggette a un calore e a una pressione così enormi che, probabilmente, nessun fossile sarebbe potuto restare intatto. Ma può darsi che, a Isua, la vita abbia comunque lasciato le sue tracce. Il carbonio, l'elemento fondamenta-

le della vita, è abbondante nelle rocce di quella formazione, e lo si trova in rapporti isotopici ($^{13}C/^{12}C$) che sono caratteristici degli organismi capaci di svolgere un'attività fotosintetica.[8] Questo aumento del carbonio 12, questo rapporto deviato delle due differenti forme del carbonio, era forse il risultato di una fotosintesi batterica? Il deposito a elevato contenuto di carbonio rappresenta forse ciò che rimane delle pareti, dei geni e delle proteine della cellula batterica? Il carbonio di Isua è sotto forma di grafite, prodottasi quando lo scisto, una specie di fango trasformato in pietra, venne a trovarsi sotto una pressione e un calore molto intensi. Se questa grafite proveniva veramente dai resti di batteri fotosintetizzanti che vivevano nel fango, l'origine della vita si sarebbe dovuta spingere, come data, fino a un punto quasi contemporaneo a quello dell'origine della superficie terrestre.

La scoperta dello Swaziland, che permise a Barghoorn di individuare veri e propri microbi fossili con un'età di 3, 4 miliardi di anni, mette in evidenza un dato di fatto sorprendente: la transizione dalla materia inanimata ai batteri richiese un tempo inferiore a quello impiegato dalla transizione dai batteri ai grossi organismi, più familiari. La vita è stata compagna della Terra fin quasi dall'origine di quest'ultima. In effetti, il legame vitale tra l'ambiente terrestre e gli organismi che vivono in esso rende praticamente impossibile anche ai biologi di dare una definizione concisa della differenza tra sostanza vivente e sostanza non vivente.

La vita, quando ebbe origine, dovendo affrontare il cambiamento, fu costretta a impiegare ogni mezzo per conservarsi. Le stesse forze energetiche che avevano reso di cruciale importanza la formazione di legami chimici tendevano ora a infrangerli. Le prime cellule, non solo dovettero catturare l'energia per mantenere la loro integrità contro forze ostili di ogni genere, ma richiesero anche acqua e cibo sotto forma di composti del carbonio, dell'idrogeno e dell'azoto. L'ambiente si modificava di continuo attorno a loro. Mentre la riproduzione ebbe origine in una volta sola, differenti strategie adattative dovettero superare molte fasi complicate per realizzarsi. Ogni impatto di meteorite, ogni emissione di gas dai vulcani, ogni

evento di siccità o di alluvione fu una crisi. La vita primordiale o riuscì a mantenere la sua integrità (utilizzando l'energia e le fonti di carbonio presenti nell'ambiente) o si perse lungo il cammino.

L'impresa stimolante di ricostruire, nei reperti fossili, lo sviluppo delle strategie messe in atto dalla vita per poter sopravvivere ha affascinato gli scienziati in questi ultimi trent'anni. Hanno dato il loro contributo tecniche raffinate; sezioni traslucide di quarzo microcristallino, più sottili di un foglio di carta, sono state analizzate al microscopio ottico, al microscopio a fluorescenza e a quello polarizzatore. Nelle migliori condizioni, i microbi fossili spiccano così bene che solo un occhio esperto riesce a distinguerli dai batteri viventi. Per esempio, un batterio fotosintetizzante fossile, *Eosynochoccus*, che è stato trovato nella Belcher Island, nella Baia di Hudson, in Canada, è così simile al moderno *Synechococcus*, ottenuto raschiando rocce in Norvegia, che la distinzione tra le due forme incontra notevoli difficoltà.

Vi sono altri modi per studiare le antiche rocce a parte quello dell'esame diretto dei fossili che esse contengono. Il più delle volte, i fossili, inclusi in scisti opachi, non si conservano affatto bene, ma la materia organica che costituisce i corpi rimane comunque intrappolata in essi. Talvolta è possibile liberarla, frantumando e macinando le rocce e trattando i frammenti con soluzioni forti. Il "succo di roccia" che ne risulta viene analizzato mediante cromatografia e spettroscopia di massa. Queste tecniche hanno portato al concetto di "fossili chimici". Gli organismi viventi contengono, naturalmente, quantità elevate di certe sostanze chimiche. Inoltre, spesso, tendono a favorire configurazioni chimiche che sono diverse da quelle che compaiono spontaneamente nelle meteoriti o in esperimenti realizzati in condizioni prebiotiche e che utilizzino gli stessi elementi. La presenza di certi tipi di composti del carbonio e di certi rapporti tra isotopi di questo elemento sono considerati indizi a favore di forme di vita antiche.

La nostra sempre maggiore conoscenza della biologia cellulare favorisce sia la ricerca sia l'analisi di questi indizi rari ed enigmatici, presenti nelle rocce. Il sapere come funziona una

cellula ci indica che cosa cercare. Nel ricostruire, attraverso la documentazione fossile, capacità e sistemi fino alle loro origini, i biologi e i paleontologi hanno avviato un'indagine globale nei misteri del passato microbico degli esseri viventi. Stiamo scoprendo una storia, sorprendente e nel contempo modesta, delle realizzazioni che la vita ha compiuto quando era ancora nella sua infanzia.

La vita primordiale (sfere di DNA, di RNA, di enzimi e di proteine, aventi un diametro di un milionesimo di metro) assomigliava probabilmente a quelle forme di vita minime che esistono tuttora. Queste, alla stessa stregua della vita primordiale, conterrebbero DNA con una capacità limitata a dirigere il metabolismo. Non vi sono geni sufficienti per produrre tutti gli amminoacidi, i nucleotidi, le vitamine e gli enzimi necessari. Molti tra questi tipi minimi di batteri meglio studiati sono parassiti che ricavano ciò di cui hanno bisogno dagli animali in cui vivono. Quando gli esseri viventi potevano assorbire i loro costituenti direttamente dall'ambiente, si comportavano letteralmente da "scrocconi", utilizzando quelle sostanze biochimiche che avevano accumulato in seguito all'esposizione di miscugli di composti alle radiazioni ultraviolette e alle scariche elettriche, in assenza di ossigeno.

Ma il festino non finiva qui. In ogni piccola nicchia, queste sostanze nutritive libere venivano rapidamente consumate dato che i microbi incessantemente le assorbivano, si accrescevano e si dividevano. Non v'è dubbio che, nei primi milioni di anni di vita sulla Terra, ogni "carestia", ogni cambiamento di clima, ogni accumulo di agenti inquinanti, derivanti dalle scorie gassose dei microrganismi, portava all'estinzione di una parte delle comunità viventi sulla faccia della Terra e probabilmente, alle volte, di quasi tutte. La vita avrebbe potuto fluttuare in tenue equilibrio con la velocità alla quale il Sole dava origine a nuove sostanze nutritive, oppure avrebbe potuto estinguersi rapidamente, se non fosse stato per un carattere di fondamentale importanza: la capacità del DNA di duplicarsi, producendo così copie supplementari che potevano modificarsi a piacere, sperimentando differenti situazioni.

La duplicazione del DNA è necessaria per la continuità della vita, ma non è sufficiente per i processi evolutivi. Per quella che Darwin chiama "discendenza con modificazione" è assolutamente necessaria la mutazione. Date le loro piccolissime dimensioni e, per contro, la loro quantità enorme, i microbi reagiscono in modo relativamente rapido a importanti cambiamenti ambientali. Se cibo ed energia sono presenti nell'ambiente, essi si riproducono senza esitazione. Batteri a rapida crescita possono dividersi ogni venti minuti circa, dando origine in teoria a 2^{144} individui.[9] Questo numero supera di gran lunga il numero complessivo di esseri umani vissuti finora sulla Terra. In quattro giorni di crescita non contenuta, i batteri giungerebbero a quota 2^{288}, una quantità di gran lunga superiore al numero di protoni (grosso modo 2^{266}) o di quark che, secondo le stime dei fisici, esisterebbero nell'universo: questo numero serve soltanto a ricordare al lettore la caratteristica della riproduzione esponenziale.

Una volta su un milione di volte circa, compare un individuo che non è identico al genitore. (I batteri, riproducendosi asessualmente per divisione semplice, hanno un unico genitore.) Nella maggior parte dei casi, questi individui mutanti sono difettosi rispetto al genitore e quindi muoiono. Ma basta un unico mutante con caratteristiche migliori perché esso possa diffondersi rapidamente in tutto l'ambiente.

I rischi che l'ambiente può presentare (variazioni di temperatura, qualità e quantità di luce solare, concentrazione di sali nell'acqua) hanno avuto tutti il loro peso, in sedi diverse, nel diversificare le popolazioni di microbi. Nella patina planetaria, di fronte a una carenza alimentare, ha cominciato ad accumularsi una varietà di nuovi batteri dotati di nuovi semi, cioè di nuove vie metaboliche, con i quali sono riusciti a ricavare con successo sostanze nutritive ed energia da varie materie prime.

Una delle prime innovazioni ha permesso alle cellule di utilizzare gli zuccheri e di trasformare l'energia contenuta nello zucchero in energia contenuta nell'ATP. I prodotti secondari di questa trasformazione (alcooli e acidi), a minore contenuto energetico, sono stati quindi eliminati come sostanze di rifiu-

to. Il DNA assorbe le radiazioni ultraviolette della luce solare e poiché queste tendono a frammentarlo, le specie di batteri che erano in grado di farlo sono rimaste nel fango e nell'acqua, lontano dalle radiazioni solari che colpivano la superficie terrestre. Queste specie sono vissute a spese delle sostanze che trovavano nel suolo e hanno elaborato vari processi di demolizione degli zuccheri, complessivamente noti come fermentazione, la quale, immutata, è ancora in atto oggi. I batteri fermentanti possono partire dagli zuccheri (glucosio, saccarosio) o dai carboidrati (che, come la cellulosa e l'amido, sono catene di zuccheri più complesse) e possono anche iniziare da semplici composti contenenti azoto, come gli amminoacidi, o da alcooli e acidi. Alla fine di tutte le reazioni, il prodotto può essere anidride carbonica e alcool etilico, come nei batteri che fermentano gli ingredienti necessari per produrre vino, birra e liquori; acido lattico, come nei batteri che acidificano il latte e fanno maturare alcuni formaggi; o, infine, acido acetico e alcool etilico, come nei batteri che si formano nelle acque di scarico domestico o che producono l'aceto. Il processo fermentativo rifornisce generalmente la cellula di alcune molecole di ATP per ogni piccola molecola nutritiva che viene degradata.

Poiché i prodotti di eliminazione dei batteri fermentanti (certi acidi e alcool) contengono ancora energia, l'efficienza della fermentazione non è massima. Col tempo si sono evoluti altri microbi in grado di alimentarsi a spese dei rifiuti dei batteri fermentanti. Questi nuovi batteri scomponevano quei rifiuti, ricavando da essi una maggiore quantità di carbonio e di energia. I batteri che prosperano sui rifiuti di altri batteri sono un poco come i saprofagi attuali: gli stercorari e alcuni funghi che crescono sullo sterco. Catene alimentari di questo genere, basate sulla fermentazione, esistono ancora nei fanghi delle paludi e dei laghi, come pure nelle paludi costiere. Esistono nell'intestino degli animali e nelle pozze d'acqua permanenti, in pratica dovunque vi sia qualcosa da fermentare e dove la quantità di ossigeno e di luce sia scarsa. L'alimento di un agente fermentante è il prodotto di scarto di un altro. Gli agenti fermentanti che trasformano il cibo, producendo scarti, e i loro complementari, che trasformano questi scarti in cibo,

hanno stabilito un ciclo di trasformazioni del carbonio, che portano alla liberazione di energia. La fermentazione non va perduta. Per esempio, quando effettuiamo un esercizio fisico, come salire le scale, le nostre cellule ignorano momentaneamente la tipica modalità metabolica mediata dall'ossigeno e ritornano all'antica modalità basata sulla fermentazione. Questa, anche se meno efficiente come mezzo per ottenere l'ATP, è ancora operante in noi.

I batteri noti col nome di clostridi, che sono considerati fra i principali agenti fermentanti, estremamente simili alle forme primordiali di vita, svilupparono nel tempo anche la funzione vitale di assumere l'azoto gassoso dall'atmosfera, trasformandolo nella catena laterale degli amminoacidi (che ha qualche similitudine con l'ammoniaca), nei nucleotidi e in altri composti organici. Per fissare l'azoto è necessaria una straordinaria quantità di energia: dalle sei alle diciotto molecole di ATP per ogni molecola di azoto. Per far ciò industrialmente (per esempio, sintetizzando i fertilizzanti), occorrono una pressione che sia almeno 300 volte la pressione atmosferica normale e una temperatura di 500 °C. Non esiste né un animale né una pianta che sia in grado di sostenere simili condizioni e, a dire il vero, non lo è neppure la maggior parte dei microbi. Tutti gli organismi viventi dipendono, dunque, dai batteri azotofissatori. Senza quest'attività di catturare direttamente l'azoto gassoso dell'aria, la vita sulla Terra si sarebbe estinta da tempo per carenza di azoto. Anziché essere incluso nelle proteine di tutte le cellule come lo è oggi, l'azoto sarebbe diventato inaccessibile, trattenuto nell'aria come gas inerte. Anche oggi, la fermentazione libera piccole quantità di azoto dall'interno delle cellule all'aria; fortunatamente, i batteri azotofissatori lo restituiscono agli organismi viventi. Se il mondo vivente, nel suo complesso, non disponesse dell'espediente della fissazione dell'azoto da parte dei batteri, saremmo tutti già morti per carenza di azoto. I clostridi, gli azotobatteri, i rizobi e altri batteri analoghi hanno, invece, continuato a rifornire l'intera biosfera di composti azotati, aventi un'importanza vitale, e hanno impedito così l'instaurarsi, su scala globale, di una condizione irreversibile di malnutrizione.

Naturalmente, le popolazioni di batteri fermentanti che si stavano moltiplicando dipendevano ancora, per l'alimentazione, da composti prodotti nell'ambiente, anche se alcuni erano in grado di utilizzare l'anidride carbonica dell'aria. Ma, quando i composti organici prodotti in condizioni prebiotiche vennero consumati e scarseggiarono le pressioni si intensificarono. Tra gli antenati di un gruppo di batteri, i *Desulfovibrio*, comparve un'altra via metabolica. Questi batteri, infatti, possono respirare solfati, emettendo gas sulfurei nocivi. Nella conversione dei solfati in solfuri generano ATP, la molecola ad alto contenuto di energia. I *Desulfovibrio*, dunque, sottraevano all'ambiente i solfati, emettendo al loro posto acido solfidrico, lo stesso gas maleodorante che emana oggi dalle paludi di salmastre e da alcune sorgenti calde e che ricorda le uova marce. Nel respirare solfati, essi sintetizzavano un tipo di molecola detta anello porfirinico, che trasferiva elettroni e generava ATP nel corso di questa reazione. Il talento metabolico dei *Desulfovibrio* non andò mai perduto. La loro capacità di produrre porfirine si è conservata, è stata riutilizzata e modificata da ogni tipo di forme di vita, tra cui anche gli esseri umani. Molecole porfiriniche affini, di colore rosso vivo, circolano oggi nel sangue umano, dove trasportano ossigeno alle cellule.

Molti tipi di batteri, avendo nel loro repertorio la possibilità di produrre l'anello porfirinico, svilupparono la funzione che permetteva loro di utilizzare la più affidabile e abbondante fonte di energia dell'ambiente circostante: la luce solare. Quando una molecola qualsiasi assorbe luce, i suoi elettroni sono spinti verso uno stato di energia più elevato. Generalmente l'energia viene dissipata sotto forma di luce o di calore fino a quando la molecola ritorna allo stato normale. Ma, quando le molecole si legano a porfirine, a loro volta attaccate a proteine incluse in membrane come catene trasportatrici di elettroni, l'energia luminosa può venir conservata e sfruttata. In molti tipi di batteri, può essere conservata per essere trasformata in energia contenuta nell'ATP. L'energia dell'ATP viene utilizzata quindi per il movimento e per i processi sintetici, come la conversione dell'anidride carbonica dell'atmosfera

in alimenti e la replicazione dei composti del carbonio necessari per l'automantenimento e la crescita. La fotosintesi, il processo che permette di ottenere cibo dalla luce e dall'aria, svincolò completamente alcuni tipi di batteri dalla necessità di dipendere da composti organici preformati.

L'evoluzione della fotosintesi è indubbiamente l'innovazione metabolica singola più importante nella storia della vita sulla Terra. Non ha avuto inizio nelle piante, ma nei batteri. Il processo fotosintetico primitivo era diverso da quello che si svolge nelle piante oggi. I primi organismi fotosintetizzanti erano batteri che utilizzavano l'idrogeno gassoso o l'acido solfidrico, non producendo mai ossigeno. I batteri che vivevano alla luce del Sole prelevavano l'idrogeno necessario per la combinazione col carbonio direttamente dall'atmosfera. L'idrogeno predominava nell'Archeano, quando il Sole si era "acceso" da poco e cominciava a diffondere enormi quantità di questo elemento nello spazio. L'acido solfidrico, un gas prodotto dai vulcani, era anch'esso più abbondante sulla Terra primitiva di quanto non sia oggi. Con il trascorrere del tempo, a mano a mano che l'idrogeno atmosferico si esauriva fino a scomparire completamente dalle nicchie locali, un maggior numero di batteri fotosintetizzanti utilizzò l'acido solfidrico prodotto come scarto dai microbi fermentanti e da altri microbi, la cui respirazione era basata sulla presenza di solfuri. I batteri fotosintetizzanti, allora come adesso, utilizzavano l'energia luminosa per scindere le molecole di idrogeno ed eliminavano sferule gialle non utilizzate di zolfo condensato. I loro discendenti attuali, noti come solfobatteri verdi e purpurei, si comportano ancora in questo modo.

Avendo bisogno di luce, i microbi che potevano spostarsi per ottenere il massimo dalla loro esposizione erano avvantaggiati. Fu l'inizio del comportamento. Anche in quei tempi antichissimi, si sviluppò una combinazione tra movimenti e sistemi semplici di sensibilità chimica per individuare nuovi cibi ed evitare le sostanze tossiche.

L'origine dei movimenti rapidi nei batteri sembra doversi collegare a un dispositivo rotatorio che è sconosciuto nelle cellule dotate di nuclei. Un flagello, cioè un filamento con battito

a frusta è attaccato alla base a forma di disco del batterio. La base rotonda, nota come "motore a protoni", in realtà rotea, azionata dalle variazioni della carica elettrica. Dato che il flagello, costituito da molecole di flagellina, una sostanza di natura proteica, è attaccato a questa ruota organica, rotea, naturalmente, anch'esso. Generalmente ruota e flagello sono esterni alla cellula procariotica. Ma, in alcuni batteri come le spirochete, il flagello è interno. Al microscopio, le spirochete appaiono come minuscoli cavatappi animati. Le prime spirochete che apparvero sulla Terra furono batteri fermentanti e probabilmente si evolvettero molto precocemente nella storia della vita. Uno dei tipi più importanti di batteri, le spirochete dotate di movimenti rapidi e intolleranti all'ossigeno, è particolarmente interessante e verrà ripreso nel racconto più avanti.

I batteri che poterono sviluppare movimenti rapidi, alla stessa stregua di esseri umani dotati di automobili veloci, si trovarono in vantaggio. Una maggiore possibilità di accesso a differenti località significava un maggior numero di opportunità. Come non è necessario imparare un nuovo lavoro se, con la propria automobile, ci si può recare presso una ditta che offra il vecchio tipo di lavoro, così i microbi che si muovevano rapidamente non ebbero bisogno di elaborare nuovi metabolismi. Essi nuotavano soltanto nei punti dove si trovavano in abbondanza le sostanze nutritizie che prediligevano e continuavano a utilizzare il loro vecchio metabolismo. Erano anche esposti più frequentemente a geni e organismi estranei e così erano in grado di sviluppare complesse simbiosi in una vasta gamma di ambienti.

I microbi che utilizzavano la luce non potevano vivere sprofondati nel fango per proteggersi dagli effetti ancora lesivi delle radiazioni ultraviolette, perché si sarebbero allontanati in tal modo dalla luce di cui, invece, avevano bisogno. Al contrario, essi filtravano la luce. Vivevano in soluzioni ricche di certi sali, come il nitrato di sodio, oppure si riparavano sotto la sabbia o altre sostanze che assorbono le radiazioni ultraviolette, ma lasciano passare quelle visibili. Si "colorivano" elaborando pigmenti, che assorbivano le radiazioni dannose, e creavano om-

bra costruendo colonie così grandi da alterare lo scenario del mondo visibile.

Dall'inizio, quando la Terra era ancora coperta dalle acque, le colonie di differenti tipi di microbi formarono comunità cooperanti. Queste appaiono come schiume vistose, come chiazze color porpora o giallo Siena, e come strani pascoli a molti livelli. Le generazioni di batteri, negli strati più alti, scomparvero l'una dopo l'altra in conseguenza dell'esposizione alle radiazioni, ma i loro resti servirono a proteggere gli strati inferiori, che accumularono sabbia e sedimenti per formare una specie di coperta vivente. Gli scenari dell'Archeano, ricoperti da acque basse, furono dominati da questi intrecci di microbi e da fanghi. Si possono trovare ancora oggi (sono blocchi fibrosi così spessi che si possono affettare con una lama) lungo le coste di mari caldi, come sono quelle della Bassa California, del versante spagnolo del Mediterraneo, del Golfo Persico, dell'Australia occidentale e, perfino, stagionalmente, della costa atlantica americana dalla Nova Scotia al South Carolina. Irrilevanti come aspetto e trascurati da coloro che cercano scenari più grandiosi, questi intrecci sono esempi viventi, praticamente incontaminati dal tempo, di un antico impero puramente batterico.

A parte la filtrazione protettiva, un'altra eccellente strategia consentiva di sopravvivere ai raggi dannosi del Sole in quei tempi antichi. La messa a punto di meccanismi per riparare i danni prodotti dal Sole sul DNA si rivelò un mezzo estremamente potente per edificare sia il microcosmo sia il resto della biosfera, derivato da quello. Per esempio, un modo pratico per distruggere il DNA batterico mediante le radiazioni ultraviolette consiste nel produrre "dimeri di timina". La timina, invece di appaiarsi con la base complementare adenina, si "confonde" chimicamente e si appaia con se stessa, aggrovigliando così la molecola del DNA fino a renderla inutilizzabile. Subentrerà la morte, a meno che enzimi di riparazione non riescano a sciogliere il groviglio. Essi rimuovono la parte danneggiata, il dimero di timina, e, in sostituzione, copiano nuovo DNA perfettamente funzionante. In altre parole, i batteri, sotto la minaccia delle radiazioni ultraviolette, avevano messo

a punto la tecnica nota come escissione-saldatura (*splicing*), che è sfruttata oggi in laboratorio e viene definita ingegneria genetica. Quasi tutti gli organismi oggi hanno enzimi di riparazione, anche se, in realtà, da due miliardi di anni, la vita è protetta dal pericolo di radiazioni ultraviolette da uno strato atmosferico di ozono. In molti batteri, oggi, gli enzimi di riparazione devono essere attivati dalla luce.

La pressione tra cercare di "rappezzare" il DNA danneggiato o morire ha portato allo sviluppo di sistemi di riparazione di questo acido nucleico. Talvolta, invece di utilizzare copie intatte del proprio materiale genetico, i batteri che vivono in colonie affollate prendono a prestito il DNA dai loro vicini. Nei batteri attuali, frammenti di informazione genetica in forma di vari segmenti di DNA sono trasferiti dall'uno all'altro di differenti ceppi batterici. Benché lo scambio sia più facile tra i batteri simili sotto il profilo metabolico, qualsiasi ceppo può ricevere geni da ogni altro ceppo attraverso tutta una serie di intermediari. Ciò consente all'informazione genetica di distribuirsi nel microcosmo con facilità e con una velocità che si avvicina a quella dei moderni mezzi di telecomunicazione, se si scompongono in fattori la complessità e il valore biologico dell'informazione che deve essere trasferita. Le popolazioni batteriche, scambiandosi i geni, sono preparate ad eseguire i loro ruoli nel loro particolare ambiente e i singoli batteri trasmettono ciascuno la loro propria eredità genetica.

Adattando la propria esistenza alle dure condizioni poste dalla luce solare, il microcosmo aveva così inventato il sesso. Benché questo primo sesso fosse differente dal tipo di sesso che si incontra negli animali, si trattava comunque di sesso. Come lo definiscono i biologi, il sesso è il rimescolamento o l'unione di geni che provengono da fonti distinte. Non va identificato con la riproduzione, dato che un organismo vecchio può ricevere nuovi geni e quindi avere un sesso, senza riprodursi. Il sesso coinvolge almeno un organismo vivente, mentre la seconda fonte di geni può non essere vivente: può trattarsi di un virus o, addirittura, di DNA in provetta.

Sulla Terra primitiva venne un tempo in cui un batterio sostituì una parte dei suoi geni danneggiati dalle radiazioni solari

con geni nuovi provenienti da un virus, da un batterio vivente o addirittura dal vecchio DNA scartato di una cellula morta. Quel batterio aveva un sesso. Più variabile e più frequente del sesso meiotico degli animali, basato su uova e spermatozoi e bloccato nel processo della riproduzione, il sesso batterico ha intensificato in modo incommensurabile la complessità del microcosmo. Dato che i batteri possono mescolare i geni in un qualsiasi momento e non sono limitati a farlo solo durante la riproduzione, hanno una promiscuità genetica di gran lunga superiore a quella degli animali.

Poiché il trasferimento di geni nei batteri non dipende dalla riproduzione, occorre una breve spiegazione per afferrare bene quest'idea. All'inizio del sesso, nei batteri, vi sono due partner. Alla fine, c'è generalmente un solo individuo prodotto sessualmente, e si tratta dello stesso genitore: un batterio ricombinante che ora porta geni provenienti da due fonti. Il batterio, senza neppure riprodursi, può avere una percentuale di geni nuovi del 90%. Il primo tipo di sesso, più casuale e richiesto maggiormente in caso di esigenza immediata per la sopravvivenza, in ambienti altrimenti ostili, è diverso dal tipo di sesso delle piante e degli animali, legato alla riproduzione. Il sesso batterico ha preceduto il sesso animale di almeno due miliardi di anni e, come un jolly, ha permesso ai microbi di rimanere nel gioco dell'evoluzione.

Capitolo 5

Il sesso e lo scambio genetico a livello planetario

Il primo tipo di sesso che comparve sul nostro pianeta, il trasferimento genetico tipico dei batteri che gli studiosi di ingegneria genetica sfruttano oggi, era ed è tuttora molto importante per il buon andamento del mondo vivente. Anche se alcuni si spingono, forse, troppo in là, fino ad affermare che il sesso è comparso addirittura prima delle cellule, è indubbio che, da una certa epoca in poi nell'Archeano, oltre 3 miliardi di anni or sono, il sesso dovette comunque subire un'evoluzione. In realtà, il sesso procariotico si snoda per tutta la storia della vita sulla Terra e offre una chiave per capire come si sia sviluppata la vita stessa. La sua importanza sarebbe emersa in seguito, quando sarebbe servito come mezzo per "bloccare" geneticamente unioni simbiotiche tra organismi molto diversi. E il sesso in stile batterico è sempre stato decisivo per il "tempo di reazione" del biota, cioè per la capacità di questo a reagire prontamente ai cambiamenti e alle emergenze ambientali.

Definito a grandi linee, il sesso è semplicemente la ricombinazione di geni provenienti da più di una fonte. Poiché, nel nostro mondo di vertebrati, una simile ricombinazione genica è fondamentale per la riproduzione, che avviene per il tramite di gameti maschili e femminili (spermatozoi e cellule uovo), incontriamo difficoltà a separare il concetto di sesso dal nostro stile di riproduzione. In realtà, nella maggior parte dei membri di quattro regni su cinque del mondo vivente, la sessualità non è necessaria per la riproduzione.

I batteri si riproducono asessualmente (agamicamente), raggiungendo una dimensione che è il doppio della dimensione normale, duplicando il loro singolo filamento di DNA e quindi dividendosi: una copia di DNA va in ciascuna delle nuove cellule figlie. In alternativa alla divisione cellulare, può esservi la gemmazione: una piccola cellula, la gemma, contenente un corredo completo di materiale genetico, si forma sulla cellula parentale e si ingrossa gradualmente fino a raggiungere la dimensione adulta; a questo punto si stacca. I batteri possono anche racchiudere il loro DNA all'interno di una spora, che riesce a sopravvivere per lunghi periodi di tempo in condizioni di assoluta siccità o in altre condizioni ambientali avverse, germinando solo quando l'ambiente torna a essere più umido o comunque, parlando in generale, più favorevole.[10]

In ogni caso, lo scambio di geni procede in modo del tutto indipendente da questi processi riproduttivi e non è minimamente necessario per il loro svolgimento. In effetti nel mondo vivente la forma di sesso propria dei vertebrati, e dei mammiferi in particolare, è una rarità. Essendo legato al processo della riproduzione e dipendente da esso, non è neanche lontanamente così importante per la biosfera come lo è il sesso dei batteri. Quest'ultimo, che non deve dipendere dalla riproduzione e, quindi, può svolgersi praticamente in qualunque momento, è il filo comune che lega molte osservazioni fatte in campi diversi come la batteriologia, la clinica medica e la biologia molecolare, osservazioni che, a prima vista, sembrerebbero non correlate tra loro.

Da tempo i batteriologi avevano notato che i microrganismi si trasmettono liberamente i caratteri ereditari dall'uno all'altro. Già nel 1928, Frederick Griffith aveva scoperto che pneumococchi vivi potevano acquisire caratteri da un altro tipo di pneumococchi, anche se questi ultimi erano morti. Nel 1944, Oswald T. Avery, Colin MacLeod e Maclyn McCarty resero nota una sorprendente scoperta che era così importante e così diversa dall'opinione corrente di tutti i loro colleghi che venne recepita senza alcun clamore e fu apprezzata solo più tardi. Al di là di ogni comprensibile dubbio, i tre ricercatori poterono dimostrare che responsabile dell'acquisizione ereditaria dei ca-

ratteri derivati dal DNA di pneumococchi morti era il DNA e non la proteina. Cioè, anche se erano morte, quelle cellule patogene avevano un sesso e potevano trasferire geni fino a quando il loro DNA rimaneva intatto. Quegli scienziati di New York misero così in luce che la sostanza chimica che stava a monte di questa "trasformazione" era acido nucleico, precisamente acido desossiribonucleico (DNA). Cercare di capire che cosa c'era in questo DNA di organismi morti che permettesse di trasformare i caratteri ereditari dei batteri divenne l'ossessione di un giovane laureato di Chicago, James D. Watson, che si stava preparando per il dottorato. Assieme a un brillante ricercatore, Francis Crick, Watson riuscì a risolvere l'enigma della struttura chimica del DNA e questo risultato rivelò simultaneamente il segreto della funzione del DNA. A una trentina d'anni di distanza, struttura e funzione del DNA sono diventate il fulcro di un intero settore della scienza, la biologia molecolare, che vanta migliaia di ricercatori.

Le sorprendenti scoperte di come si formi la doppia elica e di che cosa essa possa fare, e di come la sua molecola organica possa duplicarsi e mutare, colpirono l'immaginazione non solo scientifica ma anche popolare. Anche le conquiste mediche su varie specie batteriche in grado di provocare malattie specifiche continuarono tuttavia a occupare posizioni di primissimo piano nell'attenzione pubblica. Le osservazioni su altri comportamenti microbici si svolsero, invece, al di fuori del clamore della pubblicità e in relativo isolamento, e soltanto poche persone si resero conto che le scoperte nel campo della biologia molecolare, della batteriologia e della medicina facevano parte, in realtà, di un unico fenomeno, il fenomeno della vita nel microcosmo.

Ciascuna delle discipline or ora citate aveva esplorato, e talvolta sfruttato il fatto, che in natura differenti ceppi batterici si scambiano costantemente pezzi di materiale genetico in modo più o meno casuale. In ogni cellula batterica, il numero di geni permanenti può essere 300 volte inferiore a quello di una tipica cellula nucleata (come sono le cellule di cui è fatto il nostro corpo). Ma la debolezza può essere, in realtà, vera forza e il rovescio di questo handicap genetico è che, in termini di

adattamento, il mondo batterico viene a essere incredibilmente più flessibile del nostro mondo fatto di cellule nucleate. Un batterio possiede soltanto un minimo di istruzioni semplificate, istruzioni ridotte all'osso, per potersi duplicare e mantenere. Qualunque capacità adattiva supplementare, per permettere al ceppo batterico di sopravvivere in condizioni specializzate, è conferita da particolari particelle genetiche esogene, che sono piccoli "repliconi". Questi, proprio grazie al sesso dei batteri, passano da una cellula all'altra. Talvolta si integrano nel DNA batterico principale, cioè nel genoforo; talaltra, esercitano un'influenza pur essendo staccati dal genoforo, come se fossero satelliti genetici.

Con ciò non si vuol dire che un batterio tragga necessariamente beneficio dal fatto che un replicone entri nella sua cellula. Ma vari tipi di repliconi possono rappresentare percentuali significative del suo corredo genetico e la loro influenza sulla cellula ha allora la probabilità di essere di gran lunga superiore. I trasferimenti genetici nei batteri si differenziano perché non devono attendere la riproduzione per potersi svolgere. I batteri non si alterano per un'aggiunta automatica del 50% di geni nuovi, che è sempre ciò che accade ad animali e piante dotati di riproduzione sessuale quando producono discendenza. Paradossalmente, dal nostro punto di vista di esseri umani, i procarioti hanno rapporti sessuali più frequenti e con un maggior numero di partner, eppure, come grado di somiglianza tra genitori e prole, rimangono più fedeli.

Gli esseri umani e la maggior parte degli animali e delle piante, ricevendo geni estranei, che codificano al massimo per una bassa percentuale delle loro proteine, non possono subire marcati cambiamenti nell'aspetto esteriore e nel metabolismo. Il numero enorme di cellule interconnesse e sincronizzate, che è presente in entrambi i gruppi di viventi, compromette il nostro potenziale genetico. Nel mondo dei rapidi scambi genetici tra batteri, i grossi organismi come noi rappresentano entità ingombranti, superimbottite, che possono scambiare solo alcuni dei loro geni e solo qualche volta; sono soggetti, inoltre, a notevoli restrizioni per quanto riguarda la natura dei loro partner sessuali. La specie umana e altre specie eucariotiche

sono come masse solide indurite all'interno di uno stampo genetico specifico, mentre l'insieme mobile e interscambiabile dei geni batterici è simile a un liquido o a un gas. Se le proprietà genetiche del microcosmo venissero applicate alle creature più grosse, avremmo un mondo fantascientifico, in cui le piante verdi potrebbero condividere i geni per la fotosintesi con i funghi vicini, o in cui gli esseri umani emanerebbero profumi o produrrebbero avorio dopo aver catturato geni da una rosa o da un odobenide.

Ma, nel microcosmo, le implicazioni di questo scambio genetico facile sono ancora più sbalorditive. Se, in effetti, i ceppi batterici potessero condividere tutti i loro geni, allora, rigorosamente parlando, non vi sarebbe nel mondo batterico alcuna vera specie. Tutti i batteri costituirebbero un unico organismo, un'entità capace di manipolazioni genetiche su scala planetaria o globale. Per usare le parole di Sorin Sonea e di Maurice Panisset, due batteriologi canadesi, quest'entità sarebbe in effetti «un unico tipo complesso di clone, composto da cellule estremamente differenziate (specializzate)».[11]

La varietà di meccanismi per questi scambi costanti e opportunistici consente un sorprendente numero di opzioni. Oltre al filamento principale di DNA, che i batteriologi chiamano genoforo, cromonema o replicone grande, una cellula batterica contiene, in qualunque momento, numerose molecole di DNA autoduplicantisi, i repliconi piccoli, che provengono dalle cellule di altri ceppi batterici. Alcuni di questi ultimi repliconi possono inserirsi nel filamento principale di DNA della cellula dove possono dividersi contemporaneamente a esso oppure in tempi diversi. Altri repliconi piccoli vagano liberamente nel citoplasma o si attaccano alla membrana cellulare, dirigendo la sintesi di proteine con varie finalità. Se il carattere conferito dal replicone piccolo è utile, il gene che codifica per esso può venir conservato facendolo saltare sul replicone grande. Alla stessa stregua, parte del replicone grande può venire eliminata quando risulta inutile in un determinato ambiente.

Oltre ai repliconi piccoli, frammenti passivi di DNA, che non si duplicano, possono penetrare in una cellula, se questa presenta un sito recettore appropriato, e possono sostituire un

frammento analogo sul replicone grande, alterando così il messaggio genetico. Alcuni di questi frammenti di DNA, chiamati trasposoni, sono dotati di sequenze di legame, che permettono loro di inserirsi liberamente in qualsiasi replicone, grande o piccolo che sia.

I repliconi piccoli sono noti nelle loro varie forme e guise come plasmidi, episomi, profagi, fagi e virus, quelle diaboliche particelle che infestano le nostre cellule nucleate. Ogni tipo presenta generalmente differenti caratteristiche o un differente *modus operandi*, pur essendovi una certa sovrapposizione. La maggior parte dei repliconi piccoli porta con sé un assortimento di "strumenti", geni che consentono di duplicarsi e di trasferirsi in altre cellule, oppure che permettono alla cellula ospite di esprimere l'informazione che portano con sé. Per esempio, un profago all'interno di un batterio può duplicarsi molte volte e, per diventare un virus, può racchiudere ciascuna copia di sé all'interno di un involucro proteico, che in seguito verrà utilizzato per attaccare la copia ad altri batteri. Il batterio ospite, zeppo di virus maturi, si "lisa" o disintegra, liberando così i fagi litici, come vengono chiamati in questa fase, perché possano andare a infettare altri batteri, talvolta dopo che il vento e le correnti d'acqua li hanno trasportati lontano dalle loro origini.

Nel processo di trasduzione, un frammento di DNA batterico, o qualunque altro replicone piccolo che fosse presente, può essere incluso nell'involucro proteico ed essere trasferito ad altri batteri. Nella coniugazione, il DNA che si sposta fa formare tra le due cellule un minuscolo tubo, o pilo. Attraverso questo pilo, il donatore trasferisce una copia del proprio DNA al ricevente.

La trasduzione e la coniugazione sono i principali mezzi che il mondo batterico ha a disposizione per poter condividere la propria immunità nei riguardi dei farmaci. La velocità con cui la resistenza ereditaria a un farmaco si diffonde tra le comunità di batteri dimostra in modo impressionante la potenzialità e l'efficienza della loro rete di comunicazioni. Per esempio, il gene che dirige la sintesi di un enzima che digerisce la penicillina ebbe probabilmente origine nei batteri del suolo. Attraver-

so scambi mediati da fagi, alla fine raggiunse, negli ospedali, gli stafilococchi, molti dei quali sono oggi spaventosamente resistenti alla penicillina. Secondo una stima, un eucariote che avesse avuto bisogno di un enzima analogo avrebbe dovuto attendere circa un milione di anni perché quell'enzima potesse essere prodotto da mutazioni casuali. D'altra parte, la spirocheta che provoca la sifilide è ancora suscettibile alla penicillina, probabilmente perché non ha ricevuto da altri batteri geni che sintetizzino enzimi in grado di degradarla.

Dato che il numero minimo di geni di cui dispone lo lascia privo di alcune attività metaboliche, un batterio deve necessariamente "giocare in squadra". In natura, non svolge mai le proprie funzioni singolarmente. Al contrario, in qualunque nicchia ecologica, schiere composte da diversi tipi di batteri vivono insieme, reagendo all'ambiente e modificandolo, aiutandosi l'una con l'altro mediante enzimi complementari. I vari tipi di batteri presenti nel gruppo, ciascuno in un numero enorme di copie, coordinano la liberazione dei rispettivi enzimi secondo lo stadio della funzione che devono eseguire. I loro cicli vitali si intrecciano, i prodotti di rifiuto di un tipo divenendo le fonti alimentari del tipo successivo. Concatenati in questo modo, i batteri occupano i loro ambienti e li modificano drasticamente. In quantità enormi e variabili, eseguono compiti di cui singolarmente sono incapaci.

Con altri ceppi batterici sempre presenti nei dintorni, pronti a fornire geni utili o prodotti metabolici e a riprodursi in condizioni favorevoli, l'efficienza globale del gruppo viene mantenuta al livello massimo. Con il tempo, questa selezione naturale rende il gruppo stabile e capace di sostenere un metabolismo complesso di gruppo. Le squadre di batteri sono per la biosfera ciò che i nostri organi interni sono per il nostro organismo. Dispersi in qualunque angolo vitale del pianeta, come sono disperse le nostre cellule del sangue, la loro composizione si modifica e si adatta secondo le condizioni locali. I vari arrangiamenti sono da considerarsi situazioni dinamiche, pronte a modificarsi o a ricominciare in modo nuovo se le condizioni circostanti cambiano. Talvolta, per esempio in mucchi di carbone che bruciano lentamente, le comunità bat-

teriche sono in grado di conservare il loro proprio microclima addirittura con un controllo della temperatura. Inoltre, in tutta la biosfera, esse interagiscono con varie piante, animali e funghi, in pratica con il mondo degli eucarioti. Anche questi più estesi consorzi operano con l'armonia dinamica di un singolo organismo.

I compiti assunti dalle varie comunità batteriche riguardano nientemeno che il condizionamento dell'intero pianeta. Sono i batteri che impediscono a tutta la materia un tempo vivente di diventare polvere. Ci trasformano in cibo ed energia per altri esseri viventi. Conservano, riciclandoli, gli elementi organici e inorganici della biosfera. Purificano le acque della Terra e rendono fertile il suolo. Perpetuano quell'anomalia chimica che è la nostra atmosfera, producendo costantemente nuove riserve di gas reattivi. James Lovelock, chimico inglese studioso dell'atmosfera, suggerisce che certi gas prodotti da microbi fungano da sistema di controllo per stabilizzare l'ambiente vivente. Per esempio, il metano può agire come un meccanismo di regolazione dell'ossigeno e come regolatore della zona anaerobica (priva di ossigeno), mentre l'ammoniaca, un altro gas che reagisce intensamente con l'ossigeno e, pertanto, deve venire continuamente rifornito dai microbi, svolge probabilmente un ruolo importante nel determinare l'alcalinità di laghi e oceani. Gas che, come l'anidride carbonica, produce un "effetto serra", cioè fa entrare nell'atmosfera più radiazioni di quante ne faccia uscire, facendo aumentare così la temperatura del pianeta, l'ammoniaca può essere stata anch'essa importante nel controllo del clima nei tempi antichi. Il cloruro di metile, un gas in tracce negli strati inferiori dell'atmosfera, può regolare la concentrazione dell'ozono nell'atmosfera superiore, il che ha a sua volta un effetto sulla quantità di radiazioni che raggiungono la superficie terrestre. Ciò contribuisce a fare aumentare notevolmente il numero dei microbi che producono gas. L'elenco potrebbe continuare. Così, nel complesso, l'ambiente è legato ai batteri e l'influenza di questi è così diffusa che non esiste alcun modo realmente convincente per puntare l'indice e dire: qui la vita termina e qui comincia il regno inorganico della non vita.

In effetti, il mondo batterico conserva ancora in sé la memoria del tempo in cui l'organismo non dipendeva da quell'accurato "confezionamento" del DNA che si osserva negli organismi dotati di nucleo, ma aveva molte opzioni aperte. Il DNA e l'RNA dei batteri non vennero trattenuti all'interno dei nuclei di specie che si riproducevano sessualmente, ma mantenevano una flessibilità modulare. Nel mondo batterico, frammenti di DNA "free-lance", cioè liberi, spostandosi tra la vita e la non vita, costituiscono un repertorio ricco ed efficiente di mezzi per poter studiare l'evoluzione. Quando un virus penetra nelle nostre cellule nucleate e mette in atto le sue insolite istruzioni, può produrre il caos. Tuttavia, per i batteri e per quelle parti delle cellule nucleate che sono più simili ai batteri, le intrusioni virali e di altri DNA sono un fatto abituale e, nel complesso, adattativo. Nel microcosmo, nuove combinazioni vengono di continuo provate e collaudate e l'evoluzione di queste variazioni alimenta l'evoluzione anche degli strati non batterici del biota.

Come diventa, nella sua essenza, rigorosa e limitata la vita, a mano a mano che si procede lungo la via degli eucarioti! Per la dimensione macrocosmica, l'energia e la complessità corporea di cui disponiamo, dobbiamo rinunciare alla flessibilità genetica. Con la possibilità di uno scambio genetico soltanto durante la riproduzione, siamo bloccati all'interno della nostra specie, del nostro corpo e della nostra generazione. Come si dice talvolta nel linguaggio tecnico, ci trasmettiamo i geni "verticalmente", di generazione in generazione, mentre i procarioti se li trasmettono "orizzontalmente", cioè direttamente tra vicini della stessa generazione. Di conseguenza, mentre i batteri, che godono di una fluidità genetica, sono immortali sotto il profilo funzionale, negli eucarioti il sesso finisce per legarsi alla morte.

Con comunità batteriche che vivono in ogni possibile angolo della superficie terrestre, continuando ad accrescersi e ad estinguersi, e che selezionano senza sosta le migliori soluzioni locali al problema di come conservare la vita in qualsiasi istante, la superficie terrestre viene mantenuta in una condizione stabile e ospitale. Fatto di viventi, l'ambiente è continuamente

regolato dalla vita, per la vita. Il massimo successo che consegue al fatto che tutti i geni sono stati messi in comune per riuscire ad assicurare il numero più elevato possibile di batteri finisce per portare a un aumento quantitativo di tutte le forme di vita, piante e animali compresi, e a un'accelerazione di tutti i cicli biologici. Nell'allearsi con piante e animali, i batteri formano inoltre un sistema regolatore planetario completo,[12] che ha l'effetto specifico di stabilizzare le percentuali di gas atmosferici reattivi e, come risultato generale, riesce a mantenere abitabile la Terra. Può darsi che gli esseri umani non arriveranno veramente ad apprezzare questo aspetto dell'ingegneria genetica se non quando le esplorazioni spaziali tenteranno di portare l'uomo su Marte o di rendere abitabili i satelliti su base continua, proprio ciò che i batteri hanno fatto sulla Terra nel corso della sua lunga storia.

S. Sonea e M. Panisset paragonano le attività produttive del superorganismo batterico planetario alle funzioni di un calcolatore con un'enorme banca dati (i geni batterici) e una rete globale di comunicazioni, che elabora «una maggiore quantità di informazioni di base rispetto al cervello di un qualsiasi mammifero».[13] Essi additano la diffusione a livello mondiale della resistenza agli antibiotici come prova spettacolare che «i batteri agiscono come un'entità unita, in grado di risolvere problemi complessi e di risolverli in maniera efficiente in un qualsiasi momento». L'intelligenza umana, essendosi evoluta con il superorganismo batterico ed essendo stata incitata da esso, utilizza molte tecniche simili alle sue per risolvere problemi e trasmettere informazioni. Sonea e Panisset presentano due analogie: alla stessa stregua dei microrganismi, gli esseri umani possono avere a disposizione molti strumenti e sapere come utilizzarli, ma non li portano sempre con loro. Gli esseri umani, inoltre, possono trasmettere le informazioni sia ai loro figli sia ai loro vicini, proprio come i batteri trasmettono i geni sia verticalmente ai loro discendenti sia orizzontalmente ad altri batteri. Come risultato, sia gli esseri umani sia il microcosmo conservano un fondo comune, in continuo ampliamento, di capacità tecniche. La

conoscenza acquisita non muore con l'individuo o la singola generazione.

La nostra prima consapevolezza del microcosmo fu una consapevolezza ostile. Nel Medioevo, la peste, la lebbra e le malattie veneree costrinsero a riconoscere, almeno intuitivamente, il fenomeno del trasferimento genetico a livello mondiale. Lo stile di vita dei batteri fu descritto quando e dove minacciava la società umana. Le antiche concezioni dell'essere "immondo" o posseduto e le scoperte postmedioevali dell'igiene e dell'impiego di antibiotici nella lotta contro le malattie rappresentano il fronte su cui si scontrarono per la prima volta il nuovo intelletto umano e il vecchio microcosmo planetario. Luigi Pasteur (1822-1895), che dimostrò l'origine microbica di malattie devastanti quali l'afta epizootica, la peste e il marciume della vite, diede tono a questa relazione fin da principio. Il contesto dello scontro tra intelletto e batteri definì la medicina come un campo di battaglia: i batteri venivano visti come "germi" da distruggere. Solo oggi abbiamo cominciato ad apprezzare il fatto che i batteri sono esseri normali e necessari al corpo umano e che la salute non è tanto una questione di distruggere i microrganismi quanto piuttosto di reintegrare comunità microbiche appropriate. Solo oggi abbiamo cominciato ad apprezzare il lato benigno dell'infezione, la trasmissione di caratteri desiderati, che viene realizzata nell'ingegneria genetica.

Per una visione completa, i sistemi d'informazione umani soltanto ora hanno cominciato ad avvicinarsi agli antichi sistemi batterici che hanno scambiato unità d'informazione come fa una rete di calcolatori, con una memoria che si è accumulata nel corso di miliardi di anni di continua attività. Quando ci si sposta da una visione dei microbi puramente medica a una visione che li interpreti come nostri antenati, come gli "anziani" del pianeta, allora anche le nostre emozioni cambiano, dalla paura e dall'avversione al rispetto e al timore riverente. Molto prima che noi uomini cominciassimo ad evolverci, i batteri avevano inventato la fermentazione, la ruota in forma di motore rotatorio a protoni, la respirazione basata sullo zolfo, la fotosintesi e la fissazione dell'azoto. Es-

si non sono soltanto esseri con un marcato comportamento sociale, ma si comportano come una forma di democrazia a livello mondiale, decentralizzata. Le loro cellule rimangono fondamentalmente separate, ma possono connettersi e scambiare geni con organismi appartenenti anche ad ambienti estremamente diversi. Il rendersi conto che anche i singoli individui umani rimangono fondamentalmente separati, pur potendo contattare altri individui molto diversi e scambiare con loro informazioni, può voler dire fare un passo verso l'antica saggezza del microcosmo.

Siamo appena venuti a conoscenza della sua esistenza, ma il microcosmo ha molte altre cose in serbo per noi. Il passaggio da una società industriale, basata sull'impiego di macchine a carbone e a vapore, a una società postindustriale, che dipende dalla televisione e dai calcolatori, è stato confrontato con la differenza tra cervello e muscoli. Lo stesso discorso vale per le risorse della Terra. Quando avremo sfruttato l'energia contenuta in combustibili fossili come il carbone, il petrolio e il gas naturale, la cui età si valuta in milioni di anni, potremo forse essere in grado di attingere alle risorse dell'informazione, che risalgono più addietro nel tempo, a *miliardi* di anni or sono. La microelettronica molecolare della fotosintesi, dell'ingegneria genetica, dello sviluppo embrionale e di altre tecnologie naturali sta dinnanzi a noi e ci attende. Il poter accedere a questo archivio di informazioni, il familiarizzare con questi misteri, porterà a cambiamenti così sbalorditivi che vanno ben oltre ciò che possiamo sapere oggi.

All'alba del Proterozoico, due miliardi e mezzo di anni or sono, ogni angolo della superficie terrestre pullulava di batteri. La vita aveva reagito alle radiazioni ultraviolette con il sesso e questa contagiosità benigna, questo germe di intelligenza, aveva aiutato la vita spesso a diffondere le sue utili invenzioni. Già allora erano state inventate migliaia di espedienti metabolici, praticamente tutti i principali espedienti che si conoscono oggi. Per esempio, i pigmenti carotenoidi color arancio vivo e porpora e la vitamina A, composti che proteggono dagli effetti insidiosi della luce violenta, erano già presenti in certi batteri.

Nel mondo moderno, i carotenoidi colorano le carote di arancio e la vitamina A è un precursore chimico in quel processo corporeo che produce rodopsina, il pigmento visivo dei nostri occhi. Di queste invenzioni del microcosmo, molte non sono mai andate perdute.

A un osservatore casuale il mondo all'inizio del Proterozoico sarebbe apparso come una landa in gran parte piatta e umida, estranea eppure familiare, con vulcani fumanti sullo sfondo, abbondanti specchi d'acqua poco profondi, dai colori brillanti, e misteriose chiazze verdastre e brunastre di schiuma, galleggianti su quelle acque, trattenute dagli argini, tanto da conferire al suolo umido di questi ultimi una leggera coloritura come di muffa. Su quelle acque maleodoranti si sarebbe potuta notare una lucentezza rossastra. Ridotto a una prospettiva microscopica, sarebbe comparso alla vista un paesaggio fantastico di sfere color porpora, color acquamarina, color rosso e giallo, che si muovevano a scatti. All'interno di sfere violette di *Thiocapsa*, globuli gialli di zolfo in sospensione, avrebbero emesso bolle di un gas fetido. Colonie di organismi racchiusi in viscide guaine si sarebbero estesi fino all'orizzonte. In alcuni batteri, di cui un'estremità rimaneva attaccata alla roccia, l'altra estremità si sarebbe insinuata in minuscole fessure della roccia, penetrando in profondità. Lunghi e scarni filamenti si sarebbero staccati dalla massa dei loro "fratelli", strisciando lentamente alla ricerca di un posto migliore sotto il sole. Batteri a forma di frustini, che contorcendosi assumevano la forma di cavatappi o di fusilli sarebbero sfrecciati tutt'attorno. Filamenti pluricellulari e ammassi vistosi di cellule batteriche, simili a un tessuto, avrebbero ondeggiato, mossi dalle correnti, rivestendo i ciottoli con brillanti tonalità di rosso, rosa, giallo e verde. Piogge di spore, spazzate dalle brezze, sarebbero andate a sbattere contro il vasto orizzonte poco rilevato, costituito dai fanghi e dalle acque.

Gli esseri che vivevano in questa biosfera del passato erano tutti procarioti, cioè privi di nucleo: i loro geni non erano, infatti, ammassati in cromosomi contenuti all'interno di una membrana nucleare. Si erano evoluti e, in questo processo, avevano probabilmente distribuito tutti i principali sistemi me-

tabolici ed enzimatici. L'aver messo in circolo, nell'atmosfera e nell'idrosfera terrestri, i gas e i composti solubili aveva posto le basi per un ecosistema planetario. La rivoluzione dell'ossigeno che sarebbe sopraggiunta entro breve avrebbe spinto sott'acqua e sottoterra questi anaerobi dell'Archeano, ma molti batteri vissuti in questo periodo sarebbero sopravvissuti essenzialmente immutati per altri tre o più miliardi di anni.

Capitolo 6

L'olocausto causato dall'ossigeno

L'olocausto causato dall'ossigeno fu una vera e propria crisi da inquinamento a livello mondiale, che avvenne circa due miliardi di anni or sono. Prima di allora non c'era praticamente ossigeno nell'atmosfera terrestre. La biosfera originale era diversa dall'attuale come lo sarebbe quella di un altro pianeta. Ma i batteri fotosintetizzanti, color porpora e verdi, freneticamente a caccia di idrogeno, scoprirono come ultima risorsa l'acqua, il cui uso portò all'accumulo di una scoria in ultima analisi tossica, l'ossigeno. Il nostro prezioso ossigeno era in origine un gas velenoso, che veniva scaricato nell'atmosfera. La comparsa di un processo fotosintetico che produceva ossigeno e la conseguente abbondanza di ossigeno nell'ambiente misero alla prova l'ingegnosità dei batteri, specialmente di quelli che producono ossigeno e di quei microrganismi immobili, incapaci di sfuggire, spostandosi, al nuovo gas abbondante e reattivo. I microrganismi presenti nell'ambiente reagirono inventando vari espedienti e dispositivi per disintossicare e, infine, sfruttare il pericoloso inquinante.

La continua richiesta di idrogeno scatenò la crisi. La necessità da parte degli organismi viventi di composti contenenti carbonio e idrogeno aveva già quasi completamente esaurito le riserve di anidride carbonica dell'atmosfera terrestre. (Le atmosfere di Marte e Venere oggi hanno un contenuto di anidride carbonica che è ancora superiore al 95%, mentre quella terrestre ha un contenuto di solo lo 0,03%.) L'idrogeno, un gas

leggero, continuava a sfuggire fuori dall'atmosfera, dove reagiva con altri elementi, diventando sempre meno disponibile. Perfino l'acido solfidrico, gorgogliando dai crateri vulcanici, stava diventando insufficiente per le vaste comunità di batteri fotosintetizzanti che, alla fine dell'Archeano, avevano preso il predominio sul suolo e nell'acqua.

La Terra era comunque ancora ricca di un'abbondante fonte di idrogeno, l'ossido di diidrogeno (H_2O), cioè l'acqua. Fino ad allora, i legami forti tra atomi di idrogeno e di ossigeno nella molecola dell'acqua, legami molto più forti di quelli che tengono uniti i due atomi di idrogeno nella molecola di idrogeno (H_2), nell'acido solfidrico (H_2S), o in molecole organiche quali l'aldeide formica (CH_2O), erano risultati inscindibili da parte dei batteri avidi di idrogeno e pur così ricchi di risorse. A un certo momento, però, dopo che la fotosintesi si era ben affermata nell'atmosfera povera di ossigeno della Terra primitiva, un tipo di batteri dal pigmento verde azzurro risolse per sempre la carenza di idrogeno. Questi batteri erano gli antenati dei moderni cianobatteri.

Sembra che questi antenati dei cianobatteri fossero solfobatteri mutanti, giunti all'estremo per riuscire a sopravvivere in un ambiente in cui le scorte di acido solfidrico andavano scemando. Essi svolgevano già un'attività fotosintetica e possedevano al loro interno proteine organizzate in catene di trasporto degli elettroni. In alcuni, il DNA mutante, che codificava per tali catene, si duplicò. Abili nel catturare la luce solare in un centro di reazione allo scopo di generare ATP, questi batteri, per merito del loro nuovo DNA, si costruirono un secondo centro di reazione fotosintetico. Questo, utilizzando l'energia degli elettroni generati dalla luce nel primo centro, assorbì ulteriori radiazioni luminose, le quali, però, erano dotate di maggiore energia, venivano assorbite a lunghezza d'onda più corte e potevano scindere la molecola dell'acqua nei suoi due costituenti, l'idrogeno e l'ossigeno. L'idrogeno veniva rapidamente catturato e addizionato all'anidride carbonica dell'aria, producendo sostanze organiche che servivano da alimento, per esempio zuccheri. Con un'innovazione evolutiva, per quanto ne sappiamo senza precedenti nell'universo, questi alchimisti

dal colore verde-azzurro, che utilizzavano la luce come fonte di energia, avevano estratto l'idrogeno da una delle fonti più ricche del pianeta: l'acqua stessa. Questo singolo cambiamento metabolico in batteri così minuscoli ebbe importanti implicazioni nella futura storia di tutta la vita sulla Terra.

Il nuovo duplice sistema alimentato dalla luce non solo generava una maggiore quantità di ATP, ma rendeva disponibile anche una fonte pressoché inesauribile di idrogeno; con esso i primi cianobatteri ottennero uno spettacolare successo. Colonizzando ogni area disponibile, che garantisse luce solare, anidride carbonica e acqua, essi si diffusero su tutta la superficie terrestre. Oggi crescono come "erbe infestanti" su rocce, sul fondo e sulle pareti delle piscine, nelle fontanelle d'acqua potabile, sulle tende da doccia e sulle distese sabbiose, purché vi sia acqua e luce. Quando, alla fine degli anni Settanta, furono riaperte al pubblico, nella Francia meridionale, le grotte di Lascaux, le cui pareti sono coperte da dipinti realizzati da cacciatori del Paleolitico, fu necessario chiuderle di nuovo. Nel momento in cui la luce e l'acqua venivano lasciate penetrare all'interno, i cianobatteri ricominciavano ad accrescersi e a dividersi, minacciando di ricoprire interamente la superficie di quell'affascinante opera d'arte di 40000 anni addietro.

Sulla Terra primitiva, una coloritura verde-azzurra si spandeva su fanghi e rocce, ingrandendosi, dilatandosi, strisciando e rigonfiandosi, ricoprendo gradatamente gli argini dei fiumi, i frammenti di meteoriti, i detriti vulcanici e le piccole raccolte d'acqua. Come tutti i sistemi viventi che si riproducono rapidamente, i cianobatteri producevano colossali quantità di rifiuti. Mentre i loro antenati avrebbero assunto acido solfidrico (H_2S) e liberato zolfo (S), essi assumevano acqua (H_2O) ed eliminavano ossigeno (O_2). La tossicità dell'ossigeno non combinato è un fatto ben accertato e il nuovo ossigeno, prodotto in forma gassosa dalle colonie fotosintetizzanti, costituì per queste una minaccia immediata ed enorme, essendo esse molto vicine alla fonte da cui il gas scaturiva. L'ossigeno, un veleno mortale per ogni forma di vita, gorgogliava dai fanghi e dagli intricati grovigli di batteri, simili a stuoie, inquinando paludi, bacini e argini fluviali.

La tossicità dell'ossigeno dipende dalla capacità di reazione di questo gas con la sostanza organica: gas che cattura elettroni e produce radicali liberi, composti chimici a vita breve, molto reattivi, in grado di distruggere le sostanze contenenti carbonio, idrogeno, zolfo e azoto, che sono alla base della vita. L'ossigeno demolisce o rende inutilizzabili i piccoli metaboliti (sostanze nutritive), i quali altrimenti diventerebbero componenti dei sistemi cellulari. Esso si combina con gli enzimi, le proteine, gli acidi nucleici, le vitamine e i lipidi, tutte sostanze essenziali per la riproduzione cellulare. Reagisce poi prontamente con i gas dell'atmosfera, tra cui l'idrogeno, l'ammoniaca, il monossido di carbonio e l'acido solfidrico. In una parola, brucia, cioè "ossida", modificandoli profondamente, i minerali del suolo come il ferro, lo zolfo, l'uranio, e il manganese, che vengono trasformati in ematite, in pirite, in uranite e in biossido di manganese, cioè in composti nuovi di quei metalli con l'ossigeno.

All'inizio, la biosfera riuscì ad assorbire l'inquinamento da ossigeno. Fino a quando vi furono abbondanti metalli e gas che potevano reagire con l'ossigeno, questo elemento non si accumulò nell'atmosfera. Inoltre, la sua produzione variava probabilmente secondo la stagione ed era maggiore d'estate, quando l'attività fotosintetica era massima, e minima d'inverno. Alcuni microbi fotosintetizzanti dovevano essere in grado di alternare una fotosintesi che produceva ossigeno a una che avveniva senza produzione di ossigeno, in funzione del fatto che fossero disponibili in buona quantità o no idrogeno e acido solfidrico. (Come nella bella specie *Oscillatoria limnetica*, la produzione di ossigeno avvenne inizialmente in forma facoltativa. Scoperto nel 1975 da Yehuda Cohen della Marine Station di Eilat nelle acque calde del Solar Lake, nel Deserto del Negev, questo cianobatterio possiede una fisiologia "camaleontica": può utilizzare per la fotosintesi acido solfidrico quando questo composto è abbondante, nel qual caso non viene prodotto ossigeno. Ma, quando l'idrogeno viene a mancare, *O. limnetica* cambia comportamento e comincia a utilizzare l'idrogeno contenuto nella molecola dell'acqua e lascia che l'ossigeno si liberi nell'aria come prodotto di rifiuto.) La

quantità di questo ossigeno tossico fluttuava naturalmente con la stagione, con l'attività vulcanica, con l'entità della popolazione dei cianobatteri e con molte altre variabili.

Come ha messo in evidenza il paleobiologo J. William Schopf: «I reperti paleobiologici indicano... che l'avvento della fotosintesi che produce ossigeno fu quel fatto singolare che finì per portare al nostro ambiente moderno».[14] È però ancora oggetto di un vivace dibattito quale sia stato il momento esatto in cui la fotosintesi che produceva ossigeno lasciò nell'atmosfera quantità di questo gas sufficienti a modificare la Terra, anche se i reperti minerali mostrano chiaramente un improvviso aumento dell'ossigeno atmosferico.

Un'interessante indicazione che la produzione di ossigeno fosse in atto molto prima di quanto pensasse la maggior parte degli scienziati è emersa dalle stesse antiche rocce di Isua che, fornendo una certa concentrazione di grafite, segnalarono la presenza di possibili resti di batteri fotosintetizzanti. In quella località esistono alcune interessanti formazioni rocciose a strisce, fatte di bande alternate di differenti tipo di ossidi di ferro (ematite ossidata e magnetite meno ossidata). In alcuni punti le strisce hanno uno spessore di soli alcuni micrometri, in altri di metri. Le formazioni di Isua sono importanti perché ci forniscono riserve naturali di ferro estraibile. E, difatti, meno di una ventina di esse, tutte risalenti al Proterozoico, ci dà oltre il 90% delle riserve di ferro sfruttabili commercialmente. Si ritiene che, perché esse abbiano potuto formarsi, siano stati necessari ampi bacini idrici e quantità variabili di ossigeno. È probabile che batteri fotosintetizzanti che producono ossigeno si siano sviluppati in abbondanza sulla superficie di raccolte d'acqua calda di origine vulcanica, e che le loro esplosioni numeriche stagionali, associate a folate di ossigeno eliminato come scoria, abbiano prodotto quegli strati minerali colorati.

Può darsi anche che quei batteri fotosintetizzanti abbiano avuto dei collaboratori nel produrre le rocce ferrose a strisce. In acque oligotrofiche (povere di sostanze nutritive), certi batteri che ossidano il ferro o che ostruiscono le tubazioni possono assumere ossigeno dall'ambiente e ricavare energia facendolo combinare con il ferro. La combinazione dell'ossigeno

con il ferro è una reazione chimica che produce la ruggine: mentre i batteri traggono energia da essa, la ruggine si deposita sui loro corpi lunghi e filamentosi. In un ambiente privo di ossigeno, essi avrebbero proliferato probabilmente sia al di sopra sia al di sotto delle zone dove questo gas viene prodotto. Anno dopo anno, avrebbero potuto utilizzare l'ossigeno scartato come scoria ai margini delle comunità dei cianobatteri, facendolo precipitare come ruggine. Questi batteri responsabili dell'ossidazione del ferro potrebbero così aver favorito la formazione dei vasti depositi antichi di minerale ferroso. E allora le strisce di ematite e di magnetite che si alternano nelle rocce ferrose potrebbero essere una documentazione del loro antico rapporto con i cianobatteri: l'ematite sarebbe stata prodotta in estate, quando i cianobatteri emettevano una maggiore quantità di ossigeno e si formava così un ferro più "arrugginito", mentre gli strati di magnetite si sarebbero accumulati prevalentemente d'inverno, quando ristagnavano sia la produzione di ossigeno attraverso la fotosintesi sia, di conseguenza, l'ossidazione del ferro.

Durante una parte del Proterozoico, da 2,2 a 1,8 miliardi di anni or sono, la formazione di rocce ferrose a strisce avvenne in modo letteralmente esplosivo, senza precedenti. Ma che cosa accadde più di 3 miliardi di anni or sono? Se la vita microbica è davvero coinvolta nella produzione delle rocce ferrose a strisce, queste strisce scintillanti delle rocce del Labrador e della Groenlandia rappresenterebbero proprio la nascita delle comunità batteriche e sarebbero veramente la più antica testimonianza della fotosintesi batterica che produce ossigeno e, in realtà, della vita stessa.

Un altro indizio spettacolare delle primissime attività aerobiche degli organismi viventi è la disponibilità di oro, il metallo così prezioso in tutta la storia dell'umanità, che in una certa fase dell'Archeano risalì verso la superficie, partendo dalla massa fusa al centro della Terra. Quest'oro, incluso in sedimenti, è limitato a diversi aggregati di rocce dell'Archeano e quanto più esso è scarsamente diffuso oggi nel mondo, tanto più vi è qui sorprendentemente concentrato. Per esempio, le miniere di Witwatersrand, nel Transvaal in Sud Africa, rap-

presentano il 70% di tutto l'oro che sia mai circolato in tutta la storia della civiltà. Depositi meno importanti si trovano nell'Australia nordoccidentale, a Elliot Lake nell'Ontario settentrionale e nelle repubbliche meridionali dell'Unione Sovietica; nessuno di essi, tuttavia, si avvicina come resa alle miniere del Transvaal.

I minatori che, in queste miniere, discendono a molte centinaia di metri di profondità fanno davvero un viaggio all'indietro nel tempo fino ai primordi, oltre gli strati di ceneri vulcaniche e i detriti di antichi fiumi fino a raggiungere le superfici più antiche. Per cercare nuovi depositi aurei, essi seguono la vena del carbonio, uno strato distinto di conglomerato roccioso, che contiene molto carbonio organico. Questa vena, bloccata tra calcari e scisti, contiene sottili filoni di pirite, di oro e spesso di uranio. La vena di carbonio di Witwatersrand presenta anche strutture microscopiche filamentose e sferiche, per le quali la mineralogia da sola non trova una spiegazione.

D.K. Hallbauer, un esperto sudafricano di geologia economica, fu il primo a mettere queste strutture in relazione con la vita, interpretandole come componenti fossilizzate di licheni. Poiché questi si formano da una complessa alleanza fra alghe e funghi, di cui nessuna documentazione fossile compare fino a due miliardi di anni dopo la formazione dei giacimenti d'oro sudafricani, nessuno accettò l'ipotesi di Hallbauer che considerava licheni le inclusioni nella vena di carbonio. Un'ipotesi più convincente è quella secondo cui batteri filamentosi e coccoidi avrebbero trattenuto nelle loro masse detriti d'oro in forma di scagliette.

Nell'Archeano, il magma infuocato, fluendo dall'interno di una Terra impegnata in attività tettoniche, portò con sé, dal mantello fino alla superficie, minuscole quantità d'oro fuso e pesante in una forma finemente dispersa entro rocce di ferro, magnesio e silicio. Poiché l'oro può penetrare o fuoriuscire dalle rocce più fluidamente in assenza che in presenza di ossigeno, in una simile situazione avrebbe potuto essere facilmente eroso dalle rocce ad opera dei fiumi e di altri corsi d'acqua, e quindi trasportato fino al mare. Incontrando elevate concentrazioni di ossigeno e di carbonio organico, avrebbe però subi-

to un processo di "flocculazione", cioè in pratica non sarebbe rimasto in soluzione. In tutto questo processo, colonie di batteri fotosintetizzanti di ogni genere, che prosperavano sulle rive dei fiumi, avrebbero potuto svolgere una parte importante. Producendo quantità di ossigeno e di composti ad alto contenuto di carbonio potrebbero aver indotto l'oro a depositarsi fuori dall'acqua in fiocchi appiccicosi e a depositarsi lungo gli argini e sul letto degli antichi corsi d'acqua.

Certi batteri attuali (*Chromobacterium violaceum*) producono un cianato, sostanza che viene utilizzata dalle compagnie minerarie nell'estrazione dell'oro da sedimenti ad alto contenuto di carbonio. Forse gli antenati di questa specie vivevano nei fiumi dell'Archeano così ricchi di minerali, consolidando l'oro disciolto in essi in particelle ben distinte. Gli stessi ossigeno e carbonio presenti nei cianobatteri sarebbero potuti essere sufficienti a far precipitare l'oro dalla soluzione. Nell'Africa meridionale, l'oro proveniente dall'interno della Terra si depositò lungo un sistema fluviale, la cui estensione sarebbe stata, secondo le stime, cinque volte maggiore di quella del Mississippi. Alla fine, però, queste grandi vie fluviali del Witwatersrand, che 2,5 miliardi di anni or sono facevano defluire in mare enormi quantità di acqua, si estinsero. Esse furono sepolte sotto chilometri di sedimenti e si piegarono. Vennero riscoperte soltanto il secolo scorso, quando coloni boeri di origine olandese furono attratti, nel deserto del Transvaal, da chiazze dorate su rocce scure, che affioravano. Seguirono l'affioramento scavando in profondità e trovarono l'oro ripercorrendo l'antico sistema fluviale sepolto, di cui la vena ad alto contenuto di carbonio faceva parte.

Le prove più lampanti dell'esistenza di antiche ed estese alleanze batteriche sono, tuttavia, gli stromatoliti. Questi erano per il paesaggio del Proterozoico ciò che le scogliere coralline sono per gli oceani attuali: ricche e belle comunità di organismi frammisti e interdipendenti. Gli stromatoliti, rocce a forma di cupola, coniche, colonnari o a cavolfiore, presenti dovunque nei reperti fossili e ancora esistenti oggi, sono costituiti da strati di roccia che erano un tempo intrecci microbici a stuoia. Le comunità batteriche, in particolar modo di ciano-

batteri fotosintetizzanti, vivevano e morivano l'una sopra l'altra. Quando alcuni stromatoliti, come quelli delle sorgenti calde di Saratoga, nello stato di New York, furono descritti per la prima volta alla fine dell'Ottocento dal geologo Charles Walcott e da altri, furono chiamati criptozoi, una parola che deriva dal greco e significa "animali nascosti". Le dimensioni degli antichi stromatoliti superavano talvolta i nove metri in altezza.

Oggi, in aree molto ristrette del globo, possiamo vedere che gli strati superiori degli stromatoliti, che hanno uno spessore di soli pochi centimetri, sono dominati da cianobatteri fotosintetizzanti. Questa è la parte vivente del groviglio. Ogni cosa situata al di sotto consiste di batteri quiescenti, di gesso, di sabbia e di altri detriti, tenuti insieme da matrici costituite da precedenti intrecci. Lo strato superiore presenta strisce orizzontali. Al disotto di questa comunità fotosintetizzante, prosperano popolazioni di batteri anaerobi color porpora, anch'essi fotosintetizzanti, che sono la causa dei sedimenti di zolfo. Sotto ancora, vi sono altri microbi dipendenti, che vivono dei prodotti o dei residui corporei degli altri organismi. Stromatoliti viventi si trovano oggi nel Golfo Persico, nell'Australia occidentale e nelle isole Bahamas. Rompendoli, si mette in luce, con una normale lente d'ingrandimento, una massa gelatinosa costituita da differenti tipi di batteri; il precipitato carbonatico è, tuttavia, ancora opera dei cianobatteri. Sia nei grovigli che rimangono molli sia in quelli che diventano duri e compatti (per definzione gli stromatoliti), i batteri si sviluppano in strati pluricellulari che sono altrettanto complessi e differenziati, a modo loro, dei tessuti animali.

I più antichi stromatoliti noti hanno un'età di circa 3,5 miliardi di anni e i loro strati ad alto contenuto di carbonio costituiscono una prova convincente che le comunità microbiche fotosintetizzanti, aerobiche o no, erano già fiorenti a quell'epoca. Benché scarsi nelle rocce dell'Archeano, essi raggiunsero il pieno successo nel Proterozoico, dominando la scena.

Per decine di milioni di anni, l'ossigeno in eccesso fu assorbito da organismi viventi, composti metallici, gas atmosferici ridotti e costituenti metallici delle rocce. L'ossigeno cominciò ad accumularsi nell'atmosfera solo a sbalzi. Molte popolazioni

locali morirono, mentre furono messi a punto molti adattamenti e dispositivi di protezione. Dai cianobatteri di colore verde azzurro, che producevano ossigeno in maniera discontinua, derivarono batteri di colore decisamente verde come l'erba, che lo emettevano ininterrottamente. Migliaia di specie di microrganismi fotosintetizzanti aerobici si adattarono a vivere su rocce, in sorgenti d'acqua calda e sulle schiume. Ma circa due miliardi di anni or sono, in tutto il mondo, i reagenti passivi disponibili erano ormai stati utilizzati e l'ossigeno si andava accumulando rapidamente nell'aria, dilatando così una situazione catastrofica a livello planetario. La gente è oggi seriamente preoccupata da un aumento dell'anidride carbonica atmosferica dallo 0,032 allo 0,033%, aumento causato dalla massiccia combustione di carburanti fossili. Si ipotizza che l'"effetto serra", dovuto alla quantità supplementare di calore trattenuta dalla maggiore produzione di anidride carbonica, possa far fondere le calotte polari, facendo così innalzare il livello dei mari e causando alluvioni lungo le linee costiere disseminate di insediamenti urbani. Tutto ciò sfocerebbe in decessi e distruzioni di massa. Ma l'inquinamento industriale del nostro tempo, cioè del Fanerozoico, non è nulla in confronto all'inquinamento rigorosamente naturale che ebbe luogo nell'Archeano e nel Proterozoico. Circa due miliardi di anni or sono, con un paio di centinaia di milioni di anni in più o in meno, l'ossigeno cominciò rapidamente ad aumentare nell'atmosfera. Il mondo dell'Archeo-Paleozoico assistette a un aumento del tutto sorprendente della concentrazione di ossigeno atmosferico, che passò da una parte su un milione a una parte su cinque, cioè dallo 0,0001% al 21%. Fu questa di gran lunga la maggior crisi da inquinamento che la Terra abbia mai sopportato.

Molti tipi di microbi vennero subito spazzati via. L'ossigeno e la luce insieme erano letali, di gran lunga più pericolosi dell'uno o dell'altra singolarmente. Essi uccidono ancora istantaneamente quegli anaerobi che sopravvivono negli angoli senz'aria del mondo attuale. Quando è esposta alla luce e all'ossigeno, la materia vivente di questi microrganismi non adattati viene istantaneamente distrutta da impercettibili esplosioni. A

parte il modo standard di duplicazione dell'RNA, il trasferimento di geni e la mutazione, la vita microbica non ebbe difese contro quel cataclisma. Dai decessi multipli e da una potenziata sessualità, che è caratteristica dei batteri esposti a condizioni di tossicità, venne una riorganizzazione di quel superorganismo che chiamiamo microcosmo.

I batteri che avevano acquisito nuova resistenza si moltiplicarono e riuscirono a sostituire rapidamente quelli sensibili all'ossigeno, mentre altri batteri sopravvissero sotto di loro negli strati anaerobici di fango e terriccio. Da un olocausto equivalente a quello nucleare, quale noi temiamo oggi, ebbe origine una delle più spettacolari e importanti rivoluzioni nella storia della vita sulla Terra.

Fin dalle origini dell'esposizione locale all'ossigeno, la duplicazione genica e il trasferimento di geni si risolvettero in molti meccanismi protettivi. I nuovi geni erano altrettanto importanti di quanto lo sarebbero stati dei manuali per la sopravvivenza: l'informazione che contenevano, così importante per la vita sulla Terra, la cui atmosfera si era di recente arricchita di ossigeno, si diffuse in tutto il microcosmo che si stava riorganizzando. La bioluminescenza e la sintesi di vitamina E sono alcune delle innovazioni che, secondo le supposizioni degli scienziati, sarebbero comparse in risposta alla minaccia causata dall'ossigeno. Ma l'adattamento non si fermò lì. In una delle più audaci mosse di tutti i tempi, i cianobatteri inventarono un sistema metabolico che *utilizzava* proprio la sostanza che era stata un veleno mortale.

La respirazione aerobica, cioè la respirazione che utilizza l'ossigeno, è un mezzo dotato di un'ingegnosa efficienza per incanalare e sfruttare la reattività di quell'elemento allo stato gassoso. Si tratta essenzialmente di una combustione controllata, che demolisce le molecole organiche, fornendo in cambio anidride carbonica, acqua e una notevole quantità di energia. Mentre la fermentazione produce due molecole di ATP per ogni molecola di zucchero che viene demolita, la respirazione in cui, utilizzando ossigeno, viene demolita la stessa molecola di zucchero può produrre addirittura 36 molecole di ATP. Il microcosmo spinto, probabilmente non fino al punto di rottu-

ra, ma fino a un punto di profonda tensione globale, fece qualcosa di più che adattarsi: produsse una dinamo che utilizzava l'ossigeno e che modificò per sempre la vita e la sua nicchia terrestre.

Alcuni cianobatteri respirano soltanto al buio, chiaramente perché utilizzano parte dello stesso congegno molecolare sia per la catena respiratoria sia per la catena fotosintetica di trasporto degli elettroni. Le parti in comune non possono essere utilizzate simultaneamente dalle due vie. (Le alghe e le piante respirano e fotosintetizzano perché i due processi si svolgono in differenti parti della cellula: la fotosintesi nei cloroplasti e la respirazione nei mitocondri. Questi due tipi di organelli costituiscono indizi allettanti per capire il destino evolutivo dei due tipi di microbi. Indizi che verranno ripresi e sviluppati nel prossimo capitolo.)

I cianobatteri possedevano dunque sia la fotosintesi, che generava l'ossigeno, sia la respirazione che lo consumava. Avevano trovato il loro posto al sole. Con soltanto la luce del Sole, un poco di sali sempre presenti nelle acque naturali, e anidride carbonica atmosferica, potevano produrre tutto ciò di cui avevano bisogno: acidi nucleici, proteine, vitamine e i meccanismi per produrle. Se l'attività biosintetica da sola dovesse essere considerata una misura di progresso evolutivo, noi, esseri umani, saremmo ben più indietro dei cianobatteri. I nostri complicati fabbisogni nutrizionali ci rendono totalmente dipendenti da piante e microbi per rifornirci di ciò che non siamo in grado di produrre da soli. Siamo, in un senso molto reale, parassiti del microcosmo.

Cosa che non sorprende, con le maggiori quantità di energia che avevano a disposizione, i cianobatteri si moltiplicarono in centinaia di forme differenti, dalle minuscole (la maggior parte con un diametro di soli pochi micrometri) alle grosse (80 micrometri cioè l'8% di un millimetro). Essi produssero semplici sfere incluse in una matrice gelatinosa fatta di lamine di molte cellule, filamenti ramificati in modo elaborato che potevano liberare spore umide dai loro apici e cellule contenenti speciali cisti a prova di ossigeno, nelle quali si svolgeva la fissazione anaerobica dell'azoto.

Essi si diffusero nei due maggiori estremi dell'ambiente, dalle fredde acque degli oceani alle sorgenti calde di acqua dolce. Svilupparono poi nuove relazioni alimentari quando altri batteri presero a nutrirsi dell'amido, dello zucchero di piccoli metaboliti e perfino del carbonio e dell'azoto fissati nelle loro cellule morte. Ma il fatto che ha il maggior significato è che il continuo inquinamento dell'aria prodotto dai cianobatteri costrinse altri organismi ad acquisire la capacità di utilizzare anche l'ossigeno. Ciò fece esplodere a più riprese la speciazione e la creazione di forme elaborate e di cicli di vita tra loro.

La stabilizzazione dell'ossigeno atmosferico a circa il 21% appare come un muto consenso raggiunto dal biota milioni di anni or sono. Ed è, di fatto, un contratto che viene ancora rispettato oggi. Se la concentrazione di ossigeno fosse aumentata molto di più, i reperti fossili rivelerebbero di sicuro la prova di una conflagrazione a livello mondiale. L'attuale livello di ossigeno nell'atmosfera, alto ma non troppo, dà l'impressione di una decisione consapevole di mantenere un equilibrio tra pericolo e opportunitlà, tra rischio e beneficio. Anche le foreste pluviali e le praterie sono estremamente infiammabili quando l'acqua scarseggia. Se l'ossigeno fosse presente in quantità superiore anche soltanto di poche unità per cento, gli stessi organismi viventi diventerebbero spontaneamente combustibili. D'altra parte, basta che la concentrazione di ossigeno scenda soltanto di poche unità per cento, ed ecco che gli organismi aerobici cominciano ad asfissiare. La biosfera è riuscita a conservare questo fortunato compromesso perlomeno da centinaia di milioni di anni. Mentre rimane ancora un mistero come ciò avvenga, vedremo nell'ultimo capitolo come, dalle normali proprietà di accrescimento degli organismi possano derivare meccanismi regolatori a livello mondiale, che controllano la temperatura e la composizione dei gas. Il livellamento delle quantità di ossigeno nell'atmosfera e la loro conseguente continua modulazione costituirono un evento tanto gradito quanto terribile fu l'olocausto. Un modo di spiegare quanto è avvenuto è dire che, ammettendo che i viventi abbiano bloccato l'accumulo di ossigeno, essi devono aver sviluppato una straordinaria conoscenza dei sistemi per risolvere il problema

dell'inquinamento. L'altra prospettiva è che il controllo cibernetico della superficie terrestre da parte di organismi non intelligenti chiami in causa la presunta unicità della coscienza umana. A quanto pare i microbi non programmarono di mettere sotto controllo una crisi di proporzioni scoraggianti, dovuta all'inquinamento. Ma fecero ciò che nessun ente governativo o burocrazia sulla Terra potrebbe fare oggi. Moltiplicandosi, mutando e scambiandosi geni mantennero, alcuni producendo ossigeno e altri consumandolo, l'equilibrio di questo gas sull'intero pianeta.

Pur costituendo soltanto un quinto dell'atmosfera, da un punto di vista chimico l'ossigeno dell'aria è estremamente importante: reagisce con altre sostanze chimiche formando composti stabili come l'anidride carbonica e i nitrati. Come sostiene Jim Lovelock: «L'attuale livello di pressione dell'ossigeno è per la biosfera contemporanea ciò che la corrente elettrica ad alta tensione è per lo standard di vita del secolo in cui viviamo. Si può farne anche a meno, ma le potenzialità risultano sostanzialmente ridotte. Il confronto tra le due situazioni è stretto, dato che è una prassi della chimica esprimere la capacità ossidante di un ambiente in termini di potenziale di ossido-riduzione (redox), misurato elettricamente ed espresso in volt.»[15]

Non appena nell'atmosfera furono presenti quantità significative di ossigeno si formò uno scudo di ozono. Si formò nella stratosfera, galleggiando sopra tutto il resto. Impedendo alle radiazioni ultraviolette ad alta energia di passare, questo strato di molecole a tre atomi di ossigeno mise fine alla sintesi abiotica dei composti organici.

La produzione di cibo e di ossigeno, ottenuta utilizzando l'energia luminosa, avrebbe finito per rendere i microrganismi il fondamento di un ciclo alimentare globale, che oggi si estende fino a noi; gli animali non si sarebbero mai potuti evolvere senza il nutrimento che veniva fornito loro dall'attività fotosintetica e senza l'ossigeno presente nell'aria. Il generatore di energia creato dall'inquinamento provocato dai cianobatteri fu un presupposto necessario per una nuova unità della vita: la cellula nucleata, che è la componente fondamentale dei vegetali, degli animali, dei protisti e dei funghi. Negli eucarioti, i ge-

ni sono ammassati all'interno di un nucleo e si attua un'elaborata orchestrazione dei processi interni alla cellula, che includono la presenza nell'area che circonda il nucleo (cioè nel citoplasma) di mitocondri, strutture speciali che metabolizzano l'ossigeno per il resto della cellula. Così diversa è l'organizzazione della cellula eucariotica da quella della cellula procariotica o batterica che i due tipi rappresentano, tra le forme viventi conosciute, la separazione più profonda. Forse la loro origine nel mezzo di pressioni selettive estreme, esercitate dalla catastrofe prodotta dall'ossigeno, hanno reso le cellule eucariotiche così diverse. Ma la differenza tra cellule batteriche non nucleate e cellule dotate di nucleo è di gran lunga superiore a quella che esiste tra i vegetali e gli animali.

Prima che i cianobatteri scindessero le molecole d'acqua e producessero l'ossigeno, non vi era alcun indizio che la patina vitale che ricopriva la Terra sarebbe stata qualcosa di più di una schiuma poco appariscente, che ricopriva il suolo. Che si sia sviluppata ed estesa in giardini e giungle e città è una testimonianza del potere che i viluppi di microbi e i viscidumi che ricoprivano le coste dei mari avevano nell'alterazione reciproca, nei rispettivi habitat locali. Ma i microbi crearono un impatto ancora maggiore: alterarono l'intera superficie terrestre. La biosfera, in preda al brivido e alla minaccia dell'ossigeno libero, alla fine emerse dalla crisi. Ma la Terra era cambiata, era diventata un'anomalia planetaria.

Alla metà del Proterozoico, un miliardo e mezzo di anni or sono, la maggior parte dell'evoluzione biochimica si era ormai realizzata. La superficie e l'atmosfera terrestri moderne si erano in gran parte costituite. I microbi pervadevano l'aria, il suolo e l'acqua, facendo circolare gas e altri elementi attraverso i fluidi terrestri così come fanno oggi. Con l'eccezione di pochi composti insoliti, come gli oli essenziali e gli allucinogeni prodotti dalle angiosperme e i veleni straordinariamente attivi dei serpenti, i microbi procarioti possono montare e smontare tutte le molecole degli organismi moderni.

Giudicando in prospettiva i risultati raggiunti su scala planetaria dalle forme di vita primitive, non sorprende che lo sviluppo del repertorio biochimico dei viventi perduri da oltre due

miliardi di anni. Lo stato microbico durò quasi il doppio del resto dell'evoluzione fino a oggi. Come ciò che avrebbe detto Abraham Lincoln: «Se avessi otto ore per tagliare un albero, ne impiegherei sei ad affilare l'accetta.» Il microcosmo fece lo stesso. Preparò la scena per le rispettive evoluzioni dei funghi, degli animali e delle piante, comparsi tutti in una successione relativamente rapida. Proprio come in psicologia, dove i primi anni dell'infanzia e della fanciullezza sono noti per essere decisivi per lo sviluppo della personalità adulta, i primi eoni della vita definirono i contorni della vita moderna. L'Era dei Batteri trasformò la Terra da una superficie lunare di rocce vulcaniche vetrose, disseminata di crateri, in un pianeta fertile, che abbiamo eletto a nostra dimora. L'estraneo mondo primordiale, senza atmosfera d'ossigeno, non doveva essere nulla di più. Diversamente da Marte e Venere, pianeti vicini, le cui atmosfere si assestarono, diventando miscugli chimici stabili di anidride carbonica, la Terra si caricò di energia. E, liberata dalla mercé del tempo, si arricchì di processi vitali creativi e autopoietici.

Capitolo 7

Un nuovo tipo di cellula

Con l'invenzione della respirazione aerobica, basata sull'utilizzazione dell'ossigeno, i procarioti potevano attingere a una fonte di energia che era ben al di sopra della loro capacità di sfruttamento integrale. Inconsapevoli del potere globale che stavano generando, per centinaia di milioni di anni, i batteri dotati di respirazione aerobica prosperarono nelle loro nicchie sparse in tutto il globo. Ma, mentre il livello dell'ossigeno atmosferico saliva per raggiungere il 21%, all'incirca 2 miliardi e 200 milioni di anni or sono, quando ancora la concentrazione non superava qualche unità per cento, si formò un nuovo tipo di cellula. Era una cellula eucariota in cui si distingueva un nucleo quale caratteristica fondamentale ed erano, invece, presenti alcuni componenti cellulari, i mitocondri per utilizzare l'ossigeno, una caratteristica secondaria questa, ma importante. Quando gli eucarioti vivono come cellule singole isolate si chiamano protisti. I loro fossili sono gli acritarchi. Come mette in evidenza Chet Raymo, astronomo dello Stonehill College, sembra, a livello di reperti fossili, che la differenza tra le nuove cellule e i vecchi procarioti sia drastica tanto quanto lo sarebbe quella tra la macchina volante Kitty Hawk dei fratelli Wright, seguita a una sola settimana di distanza da un Concorde.[16]

La transizione biologica tra batteri e cellule nucleate, cioè tra procarioti ed eucarioti, è così subitanea che non trova esauriente spiegazione nei cambiamenti graduali che sono interve-

nuti nel corso del tempo. La divisione tra i batteri e le nuove cellule è, di fatto, la più spettacolare di tutta la biologia. Dato che le piante, gli animali, i funghi e i protisti sono tutti basati su un progetto che contempla la presenza di un nucleo, questa loro differenziazione dai batteri riflette una loro eredità comune: gli organismi appena menzionati formano tutti assieme il superregno degli eucarioti, radicalmente diverso dal mondo dei batteri, che costituisce il superregno dei procarioti (regno delle monere).

Le nuove cellule, che non erano semplicemente batteri più progrediti, apparivano voluminose e complesse. Contenevano canali tortuosi, delimitati da membrane interne, tra le quali anche la stessa membrana che formava un involucro attorno al nucleo. Nel loro citoplasma galleggiavano organelli ben costituiti, in grado di autoriprodursi e di utilizzare l'ossigeno presente nel citoplasma. Le prime nuove cellule compaiono nelle rocce che risalgono a 1,6-1,4 miliardi di anni or sono e sono i primi acritarchi. Si pensa che questi microfossili sferici pressoché privi di interesse, con le loro spesse pareti, siano cisti resistenti, prodotte da qualche tipo di alga primitiva. Gli acritarchi più recenti, che hanno un'età inferiore al miliardo di anni, sono ancora più grossi e hanno rivestimenti esterni scolpiti, piuttosto bizzarri. Sono stati trovati, tra gli altri siti, in rocce della Scandinavia e, nel Grand Canyon in Arizona, in reperti che risalgono all'inizio del Proterozoico.

Se gli acritarchi sono realmente i resti dei primissimi eucarioti, questi dovevano possedere nuclei ben distinti dal resto della cellula mediante una membrana. Certe fotografie al microscopio ottico di sezioni di rocce del Proterozoico, provenienti da tutte le parti del mondo, mostrano chiaramente grosse cellule. All'interno delle cellule dotate di nucleo, i primi eucarioti avevano probabilmente i cromosomi. Il DNA dei cromosomi è compattato e avvolto da proteine, generalmente nel rapporto del 40% di DNA e del 60% di proteine. Oltre a questo contingente proteico, le cellule nucleate hanno una quantità di DNA che è fino a 1000 volte superiore alla quantità di DNA che si trova nelle cellule batteriche. La funzione di queste enormi quantità di DNA è uno degli enigmi più interessanti

della biologia molecolare. Mentre una parte ovviamente serve, una grande quantità di DNA è – come si dice – "ridondante", cioè è costituito da copie di geni che si sono ripetute in altre parti dei cromosomi.

Anche in alcuni eucarioti unicellulari, o protisti, come le alghe che lasciarono nell'ambiente le cisti acritarchiche, si trovavano sospese nel citoplasma strutture nelle quali erano ammassate molecole di clorofilla e che, pertanto, erano in grado di svolgere attività fotosintetica. Nelle alghe o nelle cellule che costituivano il plancton, queste componenti cellulari fotosintetizzanti, i plastidi, coesistevano con le componenti che utilizzavano l'ossigeno, i mitocondri. Come questi ultimi, i plastidi erano in grado di autoriprodursi per divisione diretta in due, pur facendo parte della cellula di un protista, più grossa. Come vedremo tra breve, può darsi benissimo che plastidi e mitocondri rappresentino batteri rimasti intrappolati all'interno di altri batteri. L'improvvisa e diffusa comparsa di acritarchi nei reperti fossili testimonia l'incontrollato successo, a partire da 1,4 miliardi di anni or sono, delle nuove cellule, che erano probabilmente comunità interconnesse di cellule dentro altre cellule. Queste nuove cellule, presentandosi come primo plancton marino apparso nel mondo, galleggiavano e si riproducevano sulla superficie degli antichi mari. Alcune si estinsero e rimasero sepolte nei sedimenti sotto forma di quegli strani corpi sferici e poligonali che sono gli acritarchi fossili.

A quanto pare, le nuove cellule erano vere e proprie alleanze tra batteri, cooperanti e centralizzate. Nel realizzarle, esse avrebbero istituito un nuovo tipo di governo cellulare. Avrebbero avuto sempre più un'organizzazione centrale e i loro vari organelli si sarebbero integrati in una nuova unità biologica. Per esempio, negli eucarioti moderni, all'interno della cellula, come per rispondere a uno scopo, si formano correnti citoplasmiche. Questi movimenti intracellulari orientati non si notano mai nei batteri. Una caratteristica che permette di distinguere al massimo i batteri dagli eucarioti è la presenza, nei primi, di un unico replicone, mentre nei secondi si hanno strutture "a perline", i cromosomi, costituite da DNA in notevole quantità, avvolto da proteine. Sono state avanzate numerose ipotesi

per spiegare queste enormi quantità di DNA nelle cellule nucleate. Per W.H.F. Doolittle e Carmen Sapienza, due esperti in biologia molecolare, si tratta di DNA "egoista", essendo la duplicazione il suo stile di vita ed essendo stato, questo DNA, capace di duplicarsi e di persistere in quell'ambiente accomodante che è l'interno della cellula eucariotica.[17] Se ciò è vero, non è indispensabile che il DNA ridondante abbia una qualsiasi funzione biologica. Per altri scienziati, il DNA in eccesso costituisce una "riserva" d'informazione genetica, alla quale dovranno attingere le generazioni future, come se si trattasse di danaro depositato in banca. Per altri, ancora, si tratta di una specie di predestinazione cellulare: l'evoluzione futura, essi sostengono, è già codificata nel DNA e la sua utilità si affermerà con il trascorrere del tempo.

Da parte nostra, pensiamo che sia estremamente improbabile che l'evoluzione sia lungimirante in questo modo. Noi supponiamo piuttosto che il DNA ripetitivo si sia originato da differenti batteri (batteri anaerobi, batteri che utilizzano l'ossigeno e altri), riunitisi in quella comunità che divenne la cellula eucariotica. Questo DNA supplementare certamente fu generato dalla tendenza del DNA a duplicarsi, ma derivò in particolare dal DNA dei membri originali della fusione, quando essi si replicarono. Copie supplementari di DNA di ogni tipo furono conservate non per "egoismo", ma perché dovevano essere utilizzate nel risolvere i problemi di confezionamento e funzionamento di quelle meraviglie in miniatura che sono i cromosomi. E, in effetti, se le molecole di DNA contenute nei nuclei di tutte le cellule del nostro corpo venissero allineate con un'estremità dopo l'altra, piuttosto che rimanere ripiegate e impacchettate strettamente nei cromosomi, formerebbero un filo lungo dalla Terra alla Luna e ritorno, non una ma oltre un milione di volte![18]

Le cellule o hanno un nucleo o ne sono prive. Non esistono situazioni intermedie. La comparsa improvvisa di cellule nucleate nei reperti fossili, la completa discontinuità tra forme viventi con nucleo e forme senza nucleo e la sorprendente complessità degli organelli che si autoriproducono all'interno della cellula suggeriscono che le nuove cellule dotate di nucleo siano

state prodotte da un processo fondamentalmente diverso dalla semplice mutazione o dal trasferimento genetico batterico. La ricerca scientifica dell'ultimo decennio ci ha convinto che questo processo era la simbiosi. Procarioti indipendenti entrarono in altri procarioti. All'interno, essi cominciarono a digerire i rifiuti cellulari e i loro propri rifiuti vennero utilizzati, a loro volta, come alimento. Da una condivisione così intima risultarono rapporti permanenti, in cui le cellule producevano cellule discendenti, ben adattate a vivere all'interno di altre cellule. Con il passare del tempo, queste popolazioni di batteri coevolutisi divennero comunità di microbi, caratterizzate da un'interdipendenza dei loro membri così marcata da essere, da un punto di vista pratico, singoli organismi stabili, i protisti. La vita aveva così compiuto un altro passo, superando tutto quell'intrecciarsi di trasferimenti genetici liberi per giungere al sinergismo della simbiosi. Organismi separati si amalgamarono creando nuovi insiemi, che erano qualcosa di più della somma delle singole parti.

Questa teoria dell'origine per simbiosi delle cellule nucleate è nuova di zecca. Alla stessa stregua del geologo svizzero Alfred Wegener che, per primo, propose il concetto di deriva dei continenti considerando semplicemente la forma di questi, che ricorda quella dei pezzi di un *puzzle*, i naturalisti della fine del secolo scorso, servendosi del microscopio composto, che era stato appena inventato, videro inclusioni simili a batteri nelle cellule sia vegetali sia animali e si chiesero se potevano essere o non essere state batteri. Fin dal 1893 il naturalista tedesco A. Schimper propose l'ipotesi che le componenti fotosintetizzanti delle cellule vegetali fossero derivate da cianobatteri (o alghe azzurre, come erano chiamate a quell'epoca). Nel primo quarto di questo secolo, l'anatomico americano Ivan Wallin e il suo allievo russo Konstantin S. Mereschovsky erano giunti indipendentemente alla stessa conclusione. Nel 1910, Mereschovsky, che insegnava all'Università di Kazan, pubblicò una teoria essenzialmente moderna sull'origine delle cellule eucariotiche dai vari tipi di batteri. Il mondo della biologia ha impiegato oltre settant'anni a mettersi al passo con lui.

La nascita della genetica moderna ha posto però l'accento

sul nucleo della cellula eucariotica e, in questo secolo, era ormai diventata abitudine comune liquidare le teorie della simbiosi cellulare come insensate o assurde. Si giunse a tal punto che Richard Klein dell'Università del Vermont poteva dire ancora, agli inizi degli anni Settanta: «Quella cattiva moneta, la teoria dell'origine simbiotica dei plastidi e del mitocondri, è stata a lungo in circolazione... Non vi è chiaramente alcuna base chimica, strutturale o filogenetica su cui possa poggiare quella convinzione.»[19] Ancora una ventina di anni or sono si insegnava agli studenti universitari che gli organelli all'interno della cellula eucariotica probabilmente si erano staccati dal nucleo e avevano sviluppato in seguito le loro specifiche funzioni ben distinte. Tuttavia, quando fu possibile analizzare il DNA, emerse in tutta evidenza che una simile teoria aveva un difetto importante: non poteva spiegare la presenza di DNA in certi organelli, né il fatto che questo DNA fosse simile a quello dei genofori batterici e diverso, invece, da quello dei cromosomi contenuti nel nucleo. Nel 1962, Hans Ris, uno studioso di biologia cellulare all'Università del Wisconsin, scoprì alcune strutture che avevano un aspetto simile a quello del DNA presente nei cloroplasti di *Chlamydomonas*, un'alga verde. Egli fu subito colpito da questa somiglianza tra DNA dei cloroplasti e DNA dei cianobatteri. Da quel momento in poi, cominciarono ad accumularsi "prove chimiche, strutturali e filogenetiche" in favore dell'idea che, per alcune parti di cellule nucleate, vi sia un'origine da batteri liberamente viventi.

Nelle religioni umane e nella mitologia ci sono sempre state molte combinazioni fantastiche: sirene, sfingi, centauri, diavoli, vampiri, licantropi e serafini, che uniscono parti di diversi animali per dare origine a esseri immaginari. Essendo la verità più fantasiosa dell'invenzione, la biologia ha perfezionato l'idea intuitivamente gradita scoprendo la travolgente probabilità statistica della realtà degli esseri combinati. Noi e tutti gli esseri viventi fatti di cellule nucleate siamo probabilmente creature composite, nate dalla fusione di creature in tempi diversi. Le cellule del cervello umano che hanno concepito queste creature sono esse stesse chimere, fusioni non meno fantastiche di diversi tipi di procarioti, un tempo indipendenti e poi

evolutisi insieme. Nessuno ha vissuto abbastanza a lungo da poter essere stato testimone dell'origine delle specie in natura. Ma, in laboratorio, in un unico caso, una nuova varietà di microbi si è evoluta così rapidamente da poter essere colta sul fatto. Questo evento rappresentativo venne fortunatamente osservato e descritto da Kwang Jeon, un brillante scienziato e acuto osservatore del Dipartimento di Zoologia dell'Università del Tennessee.[20] L'odissea simbiotica documentata da Jeon mostra la dinamica che noi riteniamo essere responsabile della rapida evoluzione, circa un miliardo e mezzo di anni or sono, delle cellule nucleate a partire da batteri anucleati. Il racconto dimostra fermamente l'inevitabilità di un certo tipo di cooperazione tra organismi che devono vivere insieme e sopravvivere. Mostra anche la linea di confine sottile che esiste tra competizione evolutiva e cooperazione. Nel microcosmo, ospiti e prigionieri possono essere la stessa cosa, e il più mortale nemico può diventare indispensabile per la sopravvivenza.

Jeon aveva allevato per anni amebe, compiendo esperimenti su di esse. A un certo momento ricevette in laboratorio un nuovo lotto e, dopo averlo sistemato in piccole particolari beute vicino alle altre amebe raccolte in tutte le parti del mondo, notò il diffondersi di una grave malattia. Le amebe sane assumevano una forma rotondeggiante e il loro citoplasma diventava granuloso. Non si alimentavano più e non riuscivano più a dividersi. In una beuta dopo l'altra, morivano in quantità sempre maggiore. Le poche che continuavano a svilupparsi e a dividersi lo facevano con molta riluttanza, circa una volta al mese invece che a giorni alterni.

Quando Jeon osservò al microscopio le forme morte o moribonde, notò delle macchioline all'interno della cellula. Esaminandole più attentamente, vide che in ogni ameba erano presenti circa 100000 batteri a forma di bastoncino, portati dalle nuove amebe. Questi batteri avevano infettato tutto il resto. La malattia non apparve però come una catastrofe totale. Una piccola minoranza di amebe infettate sopravvisse al flagello e questi esemplari "batterizzati" erano microrganismi delicati, fragili, ipersensibili al calore, al freddo e alla mancanza di cibo. Essi venivano uccisi facilmente dagli antibiotici, i quali, le-

tali per i batteri, non danneggiavano invece le amebe "non batterizzate". Stava avvenendo un cambiamento: i due tipi di organismi, batteri e amebe, si stavano trasformando in una cosa sola.

Per un periodo di circa cinque anni, Jeon coltivò le amebe infette, riuscendo a ottenere di nuovo amebe sane; per avere questo risultato, selezionava le più resistenti e lasciava morire le altre. Ancora infette, le amebe ripresero a dividersi a giorni alterni, secondo la norma. Dal punto di vista della riproduzione, esse apparivano adattate come le loro antenate non infettate. Non si erano liberate dai batteri: tutte contenevano "germi", ma erano guarite dalla malattia. Ogni ameba guarita conteneva circa 40000 batteri.

Da parte loro, i batteri avevano regolato le loro tendenze distruttive in un modo spettacolare per poter vivere all'interno di altre cellule viventi. Così, da un confronto violento emerse un nuovo tipo di organismo simbionte: le amebe batterizzate. Oggi, a una decina d'anni di distanza da quel flagello, le amebe infettate in permanenza non sono più malate, ma vivono e sono in buona forma a Knoxville, nel Tennessee.

La storia non finisce qui. Sfruttando la propria perizia nel manipolare i nuclei delle amebe, Jeon proseguì con tenacia gli esperimenti originali, reclamando da amici alcune delle amebe che aveva inviato loro prima che esplodesse l'epidemia e che non erano mai state esposte ai batteri patogeni. Con un ago di vetro uncinato asportò i nuclei sia da amebe infette sia da amebe non infettate e li scambiò.

Le amebe infette con i nuovi nuclei vissero a tempo indeterminato; quelle "incontaminate", nelle quali erano stati introdotti i nuclei di amebe infette da anni, lottarono per quattro giorni e poi morirono. Era come se i nuclei fossero diventati incapaci di tener testa a una cellula "sana". Forse, per le amebe, l'infezione batterica era diventata una necessità?

Per trovare una risposta, Jeon preparò un altro lotto e mise in atto un'opera di salvataggio. Un giorno circa prima che le amebe non infettate con i loro nuovi nuclei morissero, iniettò in alcune di esse una certa quantità di batteri. Questi crebbero rapidamente fino a raggiungere il numero di circa 40000 per

cellula; a questo punto le amebe malate ritornarono a essere sane. Si era stabilito uno standard di vita simbiotico; i batteri erano proprio quello che ci voleva.

Le amebe di Jeon possono venire uccise dalla penicillina, che si lega a siti appositi nelle pareti cellulari dei batteri presenti nel loro interno. Esse, nella loro qualità di organismi interdipendenti, vengono distrutte. Il patto tra batteri e amebe è diventato così stretto e saldo che la morte di un membro dell'alleanza significa morte per entrambi.

Jeon ha così dimostrato che le uniche differenze tra organismi che uccidono o causano malattia, organismi che vivono insieme, e i componenti indispensabili di simili alleanze sono differenze di grado. Agenti patogeni pericolosi possono diventare organelli in meno di un decennio, molto in fretta in realtà se si considerano i tre miliardi e mezzo di anni circa di evoluzione biologica. La simbiosi porta bruscamente alla comparsa di nuove specie, specie che, come le amebe batterizzate, non si sono evolute gradualmente, accumulando mutazioni per un lungo periodo di tempo.

Gli esperimenti sulle amebe fanno rilevare come sia sbagliato credere che l'evoluzione operi sempre per il "bene dell'individuo". In fin dei conti, che cos'è esattamente l'"individuo"? È la "singola" ameba contenente nel suo interno i batteri, oppure è il "singolo" batterio che vive nell'ambiente della cellula, essa stessa vivente? In verità l'individuo è qualcosa di astratto, una categoria, un concetto. E la natura ha una tendenza a far evolvere quello che è al di là di ogni categoria o concezione ristretta.

Una di queste concezioni è la credenza popolare che l'evoluzione sia una lotta a sangue in cui solo i forti sopravvivono. "La sopravvivenza del più idoneo", un motto coniato dal filosofo Herbert Spencer (1820-1903), venne utilizzato dagli imprenditori della fine dell'Ottocento per giustificare miserabili pratiche come l'impiego di manodopera infantile, il commercio degli schiavi e il ricorso a condizioni di lavoro disumane. Distorto al punto da significare che solo il più spietato vince nella "lotta per l'esistenza", il concetto implicava anche che lo sfruttamento, essendo una cosa naturale, era moralmente accettabile.

Darwin sarebbe rimasto indignato di fronte al cattivo uso fatto delle sue idee. Egli si era servito della frase di Spencer per riferirsi non ai grossi muscoli, alle abitudini predatorie o alla frusta del padrone, ma al fatto di produrre una discendenza più numerosa. Idoneo, per l'evoluzione, significa fecondo. Il nocciolo della questione non è tanto infliggere la morte, che è un fatto inevitabile, quanto propagare la vita, che non è un fatto inevitabile.

La competizione, in cui il forte vince, ha avuto molti più commenti da parte della stampa della cooperazione. Ma certi organismi apparentemente deboli sono sopravvissuti sulla lunga durata in quanto membri di coalizioni, mentre i cosiddetti forti, non essendo mai ricorsi all'espediente della cooperazione, sono stati scaricati sul mucchio di rifiuti dell'estinzione evolutiva.

Se, nella storia della vita prevale ed è importante la simbiosi, così come sembra, dobbiamo ripensare la biologia fin dall'inizio. La vita sulla Terra non è un gioco in cui alcuni organismi battono altri organismi e vincono. Essa è, invece, ciò che, nella teoria matematica dei giochi, è noto come "gioco a somma non nulla". Un gioco a somma nulla è come il ping-pong o il gioco degli scacchi, in cui un giocatore vince a spese dell'altro giocatore, che perde. Un esempio di gioco a somma non nulla è, invece, la casetta per i giochi dei bambini, o la guerra: più di un giocatore può vincere e più di una parte può perdere. La vita è realmente un gioco a somma non nulla molto più di quanto parecchia gente pensi. L'esperto di scienze politiche Robert Axelrod ha indetto un convegno, a cui ha partecipato un gruppo di esperti della teoria dei giochi, di economisti, di esperti di biologia evoluzionistica e di matematici, provenienti da tutto il mondo.[21]

Costoro hanno presentato programmi al calcolatore per *Prisoner Dilemma*, un gioco a somma non nulla, in cui i partecipanti ottengono tre punti se cooperano entrambi e un punto soltanto se disertano entrambi. Se un giocatore diserta dopo che l'altro ha cooperato, riceve cinque punti, mentre chi ha cooperato non ne riceve nessuno. Sembra, dunque, a prima vista, che il miglior modo di ricevere punti sia quello di disertare

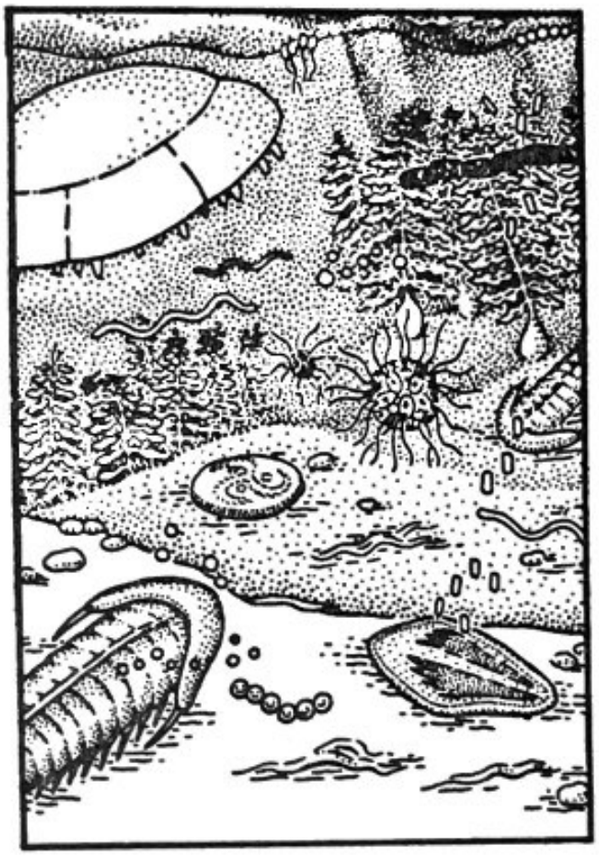
il gioco persuadendo il partner a cooperare. Ma è difficile farlo. Axelrod osservò che le più efficaci erano le strategie di "cortesia", di "indulgenza" e di "reciprocità". "Cortesia" voleva dire non essere il primo a disertare; "indulgenza" non continuare a disertare nei round successivi per "dare una lezione all'altro giocatore" se l'altro giocatore aveva disertato una volta, ma poi non l'aveva più fatto; infine, "reciprocità" significava cooperazione (e defezione) almeno una volta se l'altro giocatore lo aveva fatto. I programmi avidi e prepotenti, che cercavano di trarre vantaggio disertando in presenza di giocatori cooperanti, davano costantemente le prestazioni peggiori. Axelrod cercò quindi di fare "evolvere" i programmi rappresentando in numero sempre maggiore, nelle generazioni successive, i giocatori che raggiungevano i massimi punteggi. Dopo un numero sufficiente di generazioni, i programmi spietati ben difficilmente sopravvivevano. Axelrod concluse, dunque, che in un gioco a somma non nulla, la cooperazione aumenta con il passare del tempo. Il suo lavoro è coerente con l'opinione che tutti i grossi organismi siano derivati da procarioti più piccoli che hanno vinto insieme una battaglia per la cooperazione, per l'arte del vivere mutualisticamente.

Non è troppo stravagante dire che, se non sappiamo che pesci pigliare, se ci sentiamo incerti, fuori di noi, a pezzi, non solidali con noi stessi, è probabile che lo siamo veramente. Gli organismi veri sono come le grandi città: Los Angeles o Parigi, le quali possono essere identificate dai loro nomi, dai loro limiti e da uno stile generale di vita dei loro abitanti. Ma un'osservazione più precisa rivela che la città stessa è composta di immigranti da tutte le parti del globo, di sobborghi, di criminali, di filantropi, di gatti randagi e di piccioni.

Alla stessa stregua delle città, i singoli organismi non sono forme platoniche con limiti ben definiti. Sono, al contrario, esseri cumulativi con sottosezioni autosufficienti e tendenze amorfe. E proprio come sono insiemi compositi di specie, così sono anche le parti attive di superorganismi più grandi, il più grande dei quali è la patina planetaria. Un organello all'interno di un'ameba nell'intestino di un mammifero che vive in una foresta del pianeta Terra vive in un mondo all'interno di

molti altri mondi, ciascuno dei quali offre le proprie coordinate di riferimento e la propria realtà.

Le nostre cellule, come le amebe di Jeon, per vivere e respirare hanno bisogno con tutta probabilità dei primitivi intrusi batterici. I nostri antenati hanno lasciato nelle cellule che ci costituiscono delle impronte genetiche. La storia della primitiva fase della vita, puramente procariotica, viene conservata in particolare da tre tipi di strutture intracellulari: i mitocondri, i plastidi (cloroplasti) e gli undulipodi. Senza di essi, né il nostro mondo interiore, né il mondo esterno, né la limitata interfacies tra questi due mondi, che noi distinguiamo come umana, esisterebbero.



Capitolo 8

Vivere insieme

Tra le forme viventi, la cellula procariotica, il cui grado di complessità è paragonato a quello di una gocciolina di un miscuglio chimico inanimato, è un'entità semplice. C'è una membrana che delimita un poco di citoplasma, punteggiato di centinaia di ribosomi; attorno al centro del citoplasma si trova sospesa una molecola di DNA quasi puro, che contiene qualcosa come 4000 geni e che si presenta come un filamento poco denso, non avvolto a elica. Per contro, la cellula nucleata è più voluminosa, più complessa, costellata di mitocondri e di plastidi e attraversata da una rete di strutture reticolari, attorno alle quali pulsa il citoplasma, nel quale compaiono delle correnti. Il DNA nucleare, in buona parte ripetitivo, è avvolto a elica e forma dei cromosomi, che sono contenuti in un nucleo delimitato da una membrana, l'involucro nucleare. Le cellule eucariotiche appaiono a noi oggi, tanto perspicaci in quanto ci possiamo avvalere di un giudizio retrospettivo, come il frutto di una fusione di diversi organismi. Corporazioni viventi, alcune di queste cellule hanno avuto inizio dal sopravvento di un organismo ostile su un altro. In centinaia di milioni di anni sono poi diventate così coordinate e così compenetrate che furono necessarie la microscopia elettronica e analisi chimiche complesse per far crollare l'illusione che l'armonia delle varie parti cellulari, sembrando oggi perfetta, sia sempre stata tale.

I mitocondri sono stati i primi componenti delle corporazioni cellulari che hanno fornito indizi sulle loro origini. Le loro

piccole dimensioni e il modo semplice di dividersi avevano convinto il biologo francese Paul Portier già nel 1918 (e Ivan Wallin nel 1925) che i mitocondri erano discendenti diretti dei batteri contenuti all'interno delle cellule animali e vegetali.

Questi corpuscoli opachi, delimitati da membrane e presenti in quasi ogni cellula nucleata, fornivano alla cellula che li ospitava abbondante energia, che producevano utilizzando l'ossigeno dell'aria. Proprio per questo, tutti gli esseri viventi sulla Terra e costituiti da cellule nucleate (cioè tutti gli organismi, noi inclusi, tranne i batteri) hanno metabolismi molto simili. Non tenendo conto del metabolismo fotosintetico, che è monopolio delle piante e delle alghe (e che è praticamente identico a quello dei cianobatteri), il metabolismo degli eucarioti è lo stesso in tutti i suoi aspetti fondamentali. Per contro, i batteri mostrano di avere una gamma molto più ampia di variazioni metaboliche rispetto agli eucarioti. Indulgono in fermentazioni bizzarre, producono gas metano, "divorano", prendendolo direttamente dall'aria, l'azoto gassoso, ricavano energia da globuli di zolfo, fanno precipitare con la loro respirazione il ferro e il manganese, provocano una combustione dell'idrogeno con l'ossigeno con formazione di acqua, crescono in acque caldissime (al punto di ebollizione) e in acque salmastre, immagazzinano energia utilizzando la rodopsina, un pigmento color porpora, e via di seguito. I batteri, come gruppo, si procurano cibo ed energia con metodi ingegnosi, utilizzando come materiale di partenza ogni sorta di fibra vegetale e di rifiuto animale. (Se non facessero così, vivremmo su un mucchio crescente di rifiuti.) Noi, invece, utilizziamo soltanto uno dei numerosi progetti metabolici per la produzione di energia, e cioè la respirazione aerobica, che costituisce l'attività specializzata del mitocondri.

Nelle cellule eucariotiche, le sostanze di rifiuto che rimangono nel citoplasma dopo la fermentazione di molecole nutritive, per esempio l'alcool etilico e l'acido lattico, penetrano nei mitocondri e sono immesse in un ciclo di reazioni, che coinvolgono l'ossigeno e gli stessi tipi di catene di elettroni che si trovano nei batteri aerobi. Queste reazioni all'interno dei mitocondri producono la maggior parte dell'ATP sia per i mitocondri

stessi sia per il resto della cellula. L'ossidazione degli alimenti dà come scorie anidride carbonica e acqua.

I mitocondri hanno conservato molte tracce interessanti del loro precedente stato di esseri indipendenti. Pur essendo localizzati all'esterno del nucleo cellulare, hanno un proprio apparato genetico, che comprende il DNA, l'RNA messaggero, l'RNA di trasporto e i ribosomi, racchiusi nelle membrane mitocondriali. Come il DNA batterico, anche il DNA mitocondriale non è addensato in cromosomi e non risulta rivestito da istoni (un tipo di proteine), che avvolgono, invece, il DNA nucleare della cellula ospite. I mitocondri riuniscono le proteine sui ribosomi, che sono molto simili a quelli dei batteri. Inoltre, i ribosomi mitocondriali e quelli dei batteri che respirano tendono a essere sensibili esattamente agli stessi antibiotici, per esempio alla streptomicina.

Come la maggior parte dei batteri e diversamente, invece, dal resto della cellula nucleata, che si riproduce in modo complicato, i mitocondri subiscono una costrizione, dividendosi quindi in due parti, e lo fanno in generale in momenti diversi l'uno dall'altro e dal resto della cellula. Studi effettuati al Laboratorio Carlsberg di Copenaghen e al laboratorio del Centro nazionale della ricerca scientifica francese, a Gif-sur-Yvette, hanno dimostrato che i mitocondri mettono in atto un trasferimento genetico non sistematico, che è caratteristico del sesso batterico.

Questi e altri indizi mirano a dare la seguente spiegazione per i mitocondri: essi devono essere stati un tempo batteri, rintanatisi come simbionti all'interno di cellule batteriche più grosse di loro. Nei suoli umidi del Proterozoico o in un groviglio microbico, costituito di batteri verdi e azzurri, che emettevano da ogni loro superficie bolle gorgoglianti di ossigeno inquinante, il che costringeva ogni vivente o a evadere o a evolversi, comparve un tipo di batterio dalla respirazione basata sull'ossigeno. Doveva trattarsi, probabilmente, di un feroce predatore, forse simile a un genere di batterio predatore moderno, come *Bdellovibrio* o *Daptobacter*.

I *Bdellovibrio* sono microbi che utilizzano l'ossigeno per la respirazione e che fanno letteralmente a pezzi le loro prede, di-

vorandole dall'interno. Il loro nome deriva da due parole greche: *bdello* che significa "sanguisuga" e *vibrio* che ricorda la forma a virgola, perennemente vibrante, di questi batteri. Aggrediscono la preda, fissandosi a essa e ruotando come una trivella dal moto vorticoso; così penetrano all'interno e frantumano il materiale genetico. Dopo essersene serviti per sintetizzare i propri geni e proteine, rompono l'ormai inutile e vuoto sacchetto cellulare che costituiva il corpo dell'ospite andato distrutto.

Daptobacter, un'altra monera predatrice, attacca anch'esso selvaggiamente i batteri. Nel 1983, Isabel Esteve, dell'Universidad Autónoma di Barcellona si è accorta che, diversamente da *Bdellovibrio*, *Daptobacter* (cioè il "batterio che rosicchia") penetra sia nella membrana esterna sia in quella interna della parete cellulare della vittima. Quindi si divide chiaramente a più riprese, in condizioni sia aerobiche sia anaerobiche. Cerchiamo di immaginare l'antenato dei nostri mitocondri: un aggressore spietato, capace di utilizzare l'ossigeno per la respirazione, quando questo gas è presente nell'ambiente, oppure capace anche di farne a meno, se necessario. Gli antenati dei mitocondri hanno invaso altri nostri antenati batterici e si sono riprodotti nel loro interno. All'inizio, gli ospiti con i loro occupanti riuscirono, anche se miseramente, a sopravvivere. Ma, quando morirono, trascinarono con sé i loro assalitori. Alla fine rimasero soltanto quelle aggregazioni i cui membri erano impegnati in una cooperazione reciproca. Dopo l'attacco violento, le vittime che erano state oggetto di aggressione e i mitocondri oramai "addomesticati" si ristabilirono e da allora, cioè da un milione di anni, sono vissuti in una forma di alleanza dinamica.

A lungo termine, i predatori più feroci, come i microbi patogeni più temuti, estendono l'azione distruttiva e finiscono per far morire le loro vittime. La predazione in forma contenuta (cioè un attacco che non provoca morte o, se la provoca, lo fa solo lentamente) è un tema ricorrente nell'evoluzione. I precursori predatori dei mitocondri invasero e sfruttarono i loro ospiti, ma le prede resistettero. Costretti ad accontentarsi della parte usabile della preda (i suoi scarti) invece che dell'intero corpo, alcuni di loro si moltiplicarono senza mai uccidere

i loro rifornitori. Il tempo ha arrecato cambiamenti in entrambe le parti. L'ostilità è diventata interscambio. Philip John dell'Università di Reading ritiene che alcune forme di cancro rappresentino una specie di ritorno atavico allo stadio originale di ostilità procariotica. In base al comportamento peculiare dei mitocondri in molti tessuti colpiti da neoplasie, John ha concluso che non in tutti i casi le ribellioni dei mitocondri sono state represse per sempre.

Alla fine una parte delle prede ha sviluppato una tolleranza per i predatori aerobici, i quali hanno potuto così sopravvivere e rimanere in buone condizioni di salute all'interno dell'ospite, in un ambiente ricco di cibo. I due tipi di organismi utilizzavano reciprocamente i prodotti dei rispettivi metabolismi. Riproducendosi all'interno delle cellule che avevano invaso senza causare loro danno, i predatori hanno abbandonato il loro modo di vita indipendente e si sono stabiliti definitivamente all'interno. Come i cinghiali addomesticati che vivono tranquillamente sull'aia, o "il miglior amico dell'uomo", il cane, che un tempo era un lupo, così anche i germi patogeni mortali sono stati addomesticati, resi innocui. Secondo un'ipotesi molto diffusa, riguardante lo sviluppo della membrana nucleare, la preda è stata costretta a convivere con quegli ospiti che utilizzavano l'ossigeno, perché essi proteggevano il suo DNA togliendo di mezzo appunto l'ossigeno, che stava diventando predominante nel mondo esterno.

La preda originale era probabilmente un batterio più grosso, per esempio *Thermoplasma*. Pur tollerando l'ossigeno, essa lo poteva utilizzare solo in piccole quantità, di gran lunga più piccole di quelle presenti nella nostra attuale atmosfera.[22] Il batterio predato poteva essere un microrganismo resistente, in grado di proteggere i mitocondri da condizioni ambientali avverse. *Thermoplasma*, essendo in grado di sopravvivere anche in acque molto calde e acide, quali sono quelle delle sorgenti dello Yellowstone National Park, è di gran lunga la migliore testimonianza in favore di un'origine batterica della porzione principale, nucleocitoplasmica, della cellula eucariotica. Vi è anche un'altra ragione per credere che *Thermoplasma* sia il miglior candidato a essere il microbo ancestrale ospi-

te. Il suo DNA, diverso da quello di altri batteri, è protetto all'esterno da determinate proteine, simili agli istoni di quasi tutti gli eucarioti.

Nella simbiosi tra mitocondri e batteri, la sintesi degli steroidi potrebbe essere subentrata come emergenza. Gli eucarioti, per rendere flessibili le membrane, le imbottirono di steroidi, molecole lipidiche complesse a quattro anelli, la cui sintesi richiede la presenza di ossigeno atmosferico. Gli steroidi "lubrificano" le proteine di membrana, rendendo le membrane esterne e interne degli eucarioti meno compatte e quindi meno resistenti alle rotture e passibili di fondersi con maggiore facilità in un ampio intervallo di temperature. Le membrane che li contengono formano vescicole. Avvolgono i mitocondri e lo stesso nucleo. Le fasi biochimiche che fanno parte della sintesi degli steroidi hanno inizio nel citoplasma, ma proseguono poi sino in fondo nei mitocondri. La sintesi degli steroidi, dovendo svolgersi in presenza di ossigeno ed essendo apparentemente associata ai mitocondri, potrebbe essersi originata dal nuovo rapporto tra batteri aerobi e i loro involontari ospiti, tra predatore e preda.

Il predatore, una volta insiedatosi, perdette gradualmente una parte dei propri DNA e RNA. La selezione naturale tende a eliminare la ridondanza quando si sviluppano simbiosi; pertanto se, per esempio, entrambi gli organismi simbionti sintetizzano una sostanza nutritiva necessaria, gradatamente uno di loro può perdere questa capacità, facendo aumentare così il grado di interdipendenza. Ora, i mitocondri sono totalmente dipendenti dal resto della cellula. Hanno in comune con l'ospite i geni che codificano per alcune delle loro proteine, ivi compresi alcuni degli enzimi necessari per la duplicazione dei loro DNA e RNA. La cellula utilizza l'energia che i mitocondri ricavano da reazioni che richiedono la presenza di ossigeno, e i mitocondri utilizzano gli acidi organici che rappresentano i materiali di rifiuto della cellula loro preda. Quando questi processi si arrestano, noi e tutti gli altri esseri compositi moriamo.[23]

E la preda? Anche le cellule più grosse invase dai parassiti dovevano essere batteri. Erano probabilmente analoghe al mo-

derno *Thermoplasma*, o al genere affine *Sulfolobus*. Batterio resistente e versatile, *Thermoplasma* ha la capacità di sopportare gradi estremi di temperatura e di acidità, un attributo impagabile nel Proterozoico. *Thermoplasma* e *Sulfolobus* appartengono a un gruppo di batteri, la cui identità è stata riconosciuta di recente e i cui ribosomi con l'RNA ribosomale appaiono ben differenziati. Questi organismi sono chiamati *archibatteri* (cioè antichi batteri), perché la condivisione di caratteri tra loro e con tutti gli eucarioti ha suggerito ad alcuni scienziati la possibilità di una divergenza lontanissima nel tempo dal resto dei batteri. Altri batteri più noti (per esempio *Bacillus* ed *Escherichia coli*), sono definiti, invece *eubatteri* (cioè veri batteri).

Coabitando in simbiosi, gli archibatteri con gli eubatteri che li avevano invasi fecero ciò che né gli uni né gli altri avrebbero potuto fare da soli. I loro discendenti divennero il fondamento del macrocosmo. Tutte le creature ben note che vivono oggi sulla Terra, dalle alghe marine ai ricci di mare, ai leoni marini, agli uomini di mare sono unità composite, costituite da cellule nucleate. A loro volta, le cellule nucleate sono il risultato della fusione di procarioti. E ogni cellula con un nucleo è piena di mitocondri, nei quali si svolge un'attività respiratoria intensa. Questi mitocondri un tempo erano batteri.

Forse un centinaio di milioni d'anni dopo che i mitocondri si erano insediati nelle cellule, comparve nel citoplasma di alcune di queste un nuovo tipo di organismo. La genesi di quest'unione non avvenne però tramite un'infezione, bensì tramite l'alimentazione. Come Giona ingoiato da una balena, i predecessori dei plastidi, cioè delle componenti fotosintetizzanti delle cellule nucleate, furono probabilmente divorati da protoeucarioti affamati. Si trattava, probabilmente, di cianobatteri ubiquitari, quelle stesse creature che, con successo, avevano formato grovigli e costituito altissimi stromatoliti. Abitualmente divorati, questi batteri in parte resistettero non facendosi digerire dai propri ospiti, mentre i loro preziosi pigmenti per catturare le radiazioni luminose permanevano attivi.

Oggi, racchiusi all'interno di ogni pianta e di molti protisti

(per esempio la mobilissima *Euglena*), i plastidi continuano a offrire alla biosfera alimento e ossigeno, un contributo, il loro, di gran lunga superiore a quello dell'intera popolazione dei mammiferi. I plastidi ricavano il cibo dall'acqua e dalla luce solare. I mammiferi, uomo compreso naturalmente, non sono in grado di svolgere quest'attività. Da un punto di vista planetario, il ruolo principale dei mammiferi potrebbe essere quello di fertilizzanti delle piante e di vettori dei mitocondri. Ma, se tutti i mammiferi dovessero morire in un istante, vi sarebbero gli insetti, gli uccelli e gli altri organismi a fare da vettori dei mitocondri e da fertilizzanti delle piante. Invece, se le piante con i loro plastidi dovessero scomparire improvvisamente, la produzione di alimenti sul pianeta sarebbe così gravemente ostacolata che tutti i mammiferi morirebbero.

I plastidi verdi, cioè i cloroplasti, nelle piante e nelle alghe marine di colore verde sono più grossi e addirittura più vistosamente simili ai batteri che non ai mitocondri. Anch'essi, come tutti gli altri plastidi, hanno propri DNA e RNA messaggero. Anche i loro ribosomi hanno le stesse dimensioni di quelli dei batteri. Come i mitocondri, i plastidi sono avvolti da una membrana che li separa dal resto della cellula. Alla stessa stregua del DNA batterico, il DNA dei plastidi non è aggrovigliato con l'istone, come lo è il DNA dei cromosomi. I plastidi all'interno delle cellule si dividono direttamente in due, come i batteri. E il DNA, l'RNA e le proteine prodotte dai plastidi sono sorprendentemente simili a quelle dei batteri, specialmente dei cianobatteri.

Pur essendosi liberati della maggior parte dei mezzi per diventare autosufficienti, i plastidi possono sintetizzare molte delle loro proteine. La maggior parte, ma non tutti, ha conservato i sistemi fotosintetizzanti che contengono pigmenti verdi, rossi o azzurri e che permettono di automantenersi. Tutte le cellule delle piante contengono un tipo o l'altro di plastidio, ma alcune, che sono incolori, non sono in grado di fotosintetizzare. Nessuno sa esattamente quale funzione questi pallidi plastidi svolgano, ma la loro presenza rivela ancora un'antica alleanza tra organismi disparati.

Alla fine degli anni Sessanta, Ralph Lewin, studioso di bio-

logia marina allo Scripps Institute of Oceanography in California, scoprì un oscuro batterio verde in varie località all'interno di una fascia del Pacifico tropicale che comprende la Bassa California, Singapore e le Isole Palau. Egli chiamò quel microbo *Prochloron*. *Prochloron* si sviluppa su animali marini, le ascidie. Riveste questi organismi immobili, a forma di limone, colorandoli di verde e probabilmente rifornendoli di alcune sostanze alimentari. Alcune larve di ascidie addirittura possiedono tasche piene di *Prochloron*, il che assicura a questi organismi la possibilità di crescere simbioticamente con le successive generazioni di questi animali. La notevole dimensione cellulare e la colorazione verde di *Prochloron* hanno indotto a supporre che, come il protista *Chlamydomonas* o i simbionti delle idre verdi, *Prochloron* fosse un'alga verde. Ma le prime microfotografie elettroniche hanno turbato profondamente: *Prochloron* non era affatto un'alga, ma un enorme batterio.

Poco più di un semplice congegno a DNA, protetto da una membrana e carico di pigmenti dai colori chiari e brillanti, *Prochloron* sarebbe un cloroplasto se non avesse una tipica parete da cellula batterica e se vivesse all'interno di una cellula vegetale invece che all'esterno di un'ascidia. *Prochloron*, un anello mancante nella storia della simbiosi, combina la fisiologia di una pianta con la struttura di un batterio. (I cianobatteri sono anche verdi, in realtà verde azzurri, ma la loro fisiologia è distinta da quella delle alghe e delle piante verdi. *Prochloron* contiene sia clorofilla "a" sia clorofilla "b", il che lo rende molto più simile alle piante da un punto di vista metabolico che non ai cianobatteri, che contengono soltanto pigmenti verde azzurri e clorofilla "a".) Sembra molto probabile che gli antenati di *Prochloron* siano stati divorati da molti tipi di protisti. Alcuni resistevano alla digestione e quelli che rimanevano vivi alla fine si evolvettero in plastidi. Oggi le piante si voltano verso la luce perché senza di essa i loro ospiti esigenti morirebbero.

W. Ford Doolittle, un biochimico della Dalhousie University nella Nuova Scozia, ha confrontato la sequenza delle basi nucleotidiche dell'RNA ribosomale di plastidi rossi, estratti da un'alga di mare, *Porphyridium*, con quella dell'RNA presente

nel citoplasma di quella stessa alga, trovandovi una somiglianza inferiore al 15%. Confrontò, quindi, la sequenza con quella dell'RNA ribosomale del cianobatterio *Synechococcus* e quella di un plastidio verde di *Euglena*. Le somiglianze trovate erano dell'ordine rispettivamente del 42 e del 33%. Questo ha convinto Doolittle e altri ricercatori che, nelle alghe rosse, i cianobatteri sono antenati dei plastidi rossi, o rodoplasti. In modo analogo, anche se la biologia molecolare non è mai stata analizzata nei particolari, i plastidi verdi comuni delle piante provengono probabilmente da *Prochloron*.

Se ci si guarda attorno in natura, non si può non vedere il notevole successo che hanno raccolto i discendenti di *Prochloron*: giungle, giardini, piante d'appartamento e colline erbose testimoniano tutte del successo dei plastidi. Ingeriti, ma non digeriti, si sono insinuati in ogni angolo della Terra, progredendo come parte di quella coalizione che è la cellula eucariotica.

I nuovi eucarioti si erano così diversificati. Alcuni avevano ora due modi fondamentali a disposizione per generare ATP: la respirazione e la fotosintesi. Quelli che erano anche in grado di nuotare erano praticamente inarrestabili, a mano a mano che subentravano, sempre più in là, in ambienti compatibili con le loro esigenze. Non meraviglia, dunque, che forme come le alghe e gli organismi che costituiscono il fitoplancton abbiano cominciato a predominare sui mari e in altre località umide in tutto il mondo. In verità hanno continuato a evolversi fino al punto in cui hanno abbandonato l'acqua, hanno preso il sopravvento sulla terraferma e alla fine sono diventate le prime piante del macrocosmo.

Capitolo 9

Il cervello simbiotico

Dalla nostra posizione attuale, così lontana sulla scala evolutiva, non possiamo dire con esattezza quando, ma sembra che i batteri, all'incirca nel periodo (o poco prima) in cui, fondendosi, hanno dato origine a nuove cellule, conferendo a esse la capacità di utilizzare l'ossigeno e la luce, abbiano conferito a queste cellule anche un'altra capacità: il movimento. Confluendo in queste nuove, grandi cellule, quei batteri dal moto molto rapido hanno fatto sì che esse potessero godere dei vantaggi essenziali della locomozione: come sottrarsi al pericolo e come cercare cibo e riparo. Si resero disponibili anche altri benefici legati alla locomozione: una maggiore scelta negli habitat e maggiori opportunità di scambi genetici. La possibilità di spostarsi fu solo il beneficio più appariscente di questo tipo di cooperazione tra batteri.

Se si osserva al microscopio una cellula eucariotica viva, si rimarrà sorpresi dai movimenti vigorosi che hanno luogo nel suo interno. In netto contrasto con la cellula batterica, il cui contenuto è immobile o va passivamente alla deriva, l'interno della cellula eucariotica appare brulicante come una metropoli. Il citoplasma forma correnti e, in alcune cellule, mitocondri, ribosomi e altri organelli seguono percorsi predeterminati come se obbedissero alla segnaletica di un traffico a due corsie. Molte cellule si dilatano e si contraggono ritmicamente. In un camaleonte, il cui corpo cambia di colore, quando la cute si schiarisce particelle di pigmento sono trasportate dalla superfi-

cie verso l'interno delle cellule. In un tipo particolare di protisti, gli attinopodi (si veda la nota 1), lunghe punte mobili, che vengono utilizzate o per afferrare la preda o come trampoli per "camminare", si protendono dalla superficie della cellula. Per la maggior parte, il moto cellulare si svolge nell'ambito di un elaborato sistema di trasporto endocellulare, costituito da microtubuli, minuscoli tubicini di natura proteica del diametro di soli 24 nanometri e capaci di produrre movimento di concerto con altre proteine.[24] I microtubuli si possono osservare soltanto al microscopio elettronico.

Da parte nostra, riteniamo che la capacità motoria esterna e interna della cellula nucleata sia il frutto di una diversa fusione simbiotica con i batteri, e precisamente con le veloci spirochete, che hanno un caratteristico movimento a colpo di frusta. Diversamente da analoghe teorie, che sono state formulate per i mitocondri e per i plastidi, la nostra ipotesi non è ancora molto diffusa tra i biologi. Tra le varie componenti dell'apparato in questione non è emerso un DNA che permettesse di leggere il codice relativo al controllo della cellula un tempo estranea. In mancanza di ciò, molti scienziati si riservano di dare un giudizio sull'origine batterica dei prolungamenti cellulari, costituiti da microtubuli. Ma l'RNA, che è stato localizzato in alcune parti dell'apparato in questione, può essere direttamente responsabile dell'edificazione e della duplicazione di strutture legate alla motilità, senza un contributo da parte del DNA. Come abbiamo già visto nei capitoli sulla materia preanimata, anche l'RNA è in grado di duplicarsi e potrebbe essersi evoluto addirittura prima del DNA. Se si troveranno RNA e proteine di spirochete, che concordino con l'RNA e le proteine presenti nelle strutture responsabili del moto cellulare più che con qualunque tipo di RNA o proteina scelto a caso, allora l'ipotesi di una simbiosi con le spirochete sarà ben difficilmente confutabile.

Naturalmente, vi è un rapporto inverso paradossale tra simbiosi ed evidenza: partner che vivono insieme in un'armonia quasi perfetta saranno pressoché indistinguibili. David Smith, botanico all'Università di Oxford, paragona ciò che rimane di queste fusioni al sorriso del Gatto del Cheshire, il personaggio

felino di *Alice nel Paese delle Meraviglie*, che scompare a poco a poco fino a quando tutto ciò che rimane di lui è un largo enigmatico sorriso: «l'organismo perde progressivamente parti di sé, amalgamandosi lentamente con il sottofondo generale; la sua esistenza precedente è rivelata soltanto da qualche vestigia».[25] In questa prospettiva, certi segni rivelatori diventano ancora più interessanti.

Un esame attento degli undulipodi, minuscoli frustini cellulari, presenti in numerosi tipi di cellule nucleate, rivela una sorprendente uniformità di struttura in una vasta schiera di organismi. Questi filamenti flessuosi sono stati chiamati tradizionalmente *flagelli*,[26] se sono lunghi e pochi come le code degli spermatozoi, e *ciglia*, se sono corti e numerosi come i peli, ma tra i due tipi non esiste una sostanziale differenza. Quasi tutte le alghe, i ciliati e i missomiceti, cioè i protisti, i primissimi organismi con cellule nucleate che si siano evoluti, li hanno entrambi. Il moto a frusta o il moto ondulatorio esercita sulla cellula liberamente natante una propulsione che la fa avanzare nell'ambiente, oppure, se la cellula è fissata e non può spostarsi, agisce sulle particelle contenute nel suo interno e che sono disposte posteriormente all'organello propulsore. Dallo spermio di felce maschio alle cellule del rivestimento delle narici di topo, il numero di cellule degli organismi complessi che presenta questi organelli con moto ondulatorio è elevato.

Indipendentemente dalla cellula o dall'organismo in cui si trovano, gli undulipodi hanno tutti all'incirca un diametro di 0,25 micrometri e, in sezione trasversale, mostrano nove paia di minuscoli microtubuli, disposti a cerchio come i numeri del disco combinatore di un apparecchio telefonico; questo cerchio racchiude al suo interno un'altra coppia di microtubuli. Una simile configurazione, nota come "configurazione 9+2" (una strana denominazione, visto che 9 si riferisce alle coppie che costituiscono il cerchio esterno, mentre 2 si riferisce a ogni singolo tubulo della coppia situata al centro), si ritrova nella coda degli spermatozoi di toro, di balena e di *Gingko*; nelle ciglia delle vie respiratorie, dei polmoni e degli ovidotti della specie umana e di altre specie di mammiferi; nelle antennule delle aragoste; nelle ciglia che ricoprono il notissimo parame-

cio e in quelle che si trovano sulle zoospore di *Saprolegnia*. Questo è, in realtà, solo un piccolo campione della grande diffusione della configurazione 9+2.

Va detto, inoltre, che un undulipodio emerge invariabilmente da una struttura, il *cinetosoma*, composta da nove triplette di microtubuli disposte in circolo. Le pareti di tutti questi microtubuli contengono due proteine affini, le tubuline alfa e beta. Circa 200 proteine, tra cui una proteina estremamente complessa, la dineina, costituiscono la restante parte della struttura 9+2. Di queste proteine non tubuliniche molte non sono ancora state isolate o denominate, ma l'insieme delle prove è così decisivo che tutti gli esperti di biologia evoluzionistica ritengono che le strutture 9+2 non si siano evolute separatamente nei protisti, nelle piante e negli animali. (Poiché i funghi, pur non avendo mai undulipodi, presentano sia i microtubuli che li compongono sia le tubuline, è probabile che i loro antenati avessero flagelli cellulari, che poi hanno perduto.) Essi pensano che vi sia stata, invece, un'origine comune.

Per noi potrebbe aspirare al titolo di antenato comune la spirocheta, il batterio più veloce di tutto il microcosmo: una cellula filiforme, mobilissima, che si sposta con un movimento a elica. Nelle parti del microcosmo dove sono concentrati una fanghiglia gelatinosa e liquidi vischiosi, una massa che appare particolarmente appiccicosa, le spirochete sono spesso gli unici batteri in grado di attraversarle. Loro "mestiere" è il movimento. Alcune contengono addirittura microtubuli, benché in nessuna finora sia stata trovata una disposizione a disco combinatore di apparecchio telefonico. Questa testimonianza ci fa molto pensare che, tra le prime coalizioni di batteri, che divennero cellule con nuclei, e le spirochete o batteri simili a queste ultime, siano stati sanciti antichi patti. Le spirochete protessero sia all'interno sia all'esterno i loro vicini di diversa natura e, per finire, offrirono loro, anche se non richiesta, una valida capacità motoria. Naturalmente questa è soltanto un'ipotesi, ma aiuta a spiegare dati che altrimenti sarebbero campati in aria. Come disse Darwin nel 1859 in *L'origine delle specie*, a proposito della teoria della selezione naturale: «Chiunque si

senta portato a dare maggior peso alle difficoltà non spiegate che alla spiegazione di un certo numero di fatti respingerà certamente la mia teoria.»[27] Lo stesso discorso vale per l'ipotesi delle spirochete. Può sembrare bizzarra, ma spiega così tanti fatti, che la storia del microcosmo, dell'evoluzione del sesso e della meiosi nei cosiddetti animali superiori, rimarrebbe sminuita senza di essa.

Probabilmente, come accade di solito, la fame deve essere stata lo stimolo che ha indotto a queste nuove fusioni. I nostri antenati protisti erano spesso affamati e talvolta addirittura torturati dal digiuno. Nella nuova comunità, ogni simbionte batterico aveva bisogno di alimentarsi e le alleanze immobili erano alla mercé dell'ambiente. Nei periodi di siccità e di scarsezza di cibo, le nuove cellule non potevano fare altro che attendere. Alcune affrontavano i rischi ambientali formando cisti resistenti, dalle pareti spesse, come fanno molte cellule oggi. Quando questi lontani antenati unicellulari divennero immobili, molti batteri mobili di varie specie si imbatterono in essi e, nella loro ricerca di cibo, li facevano rimbalzare. Una parte di questi batteri brulicanti, a forma di frustino, si affollava attorno alle cisti, ripulendone la superficie, asportando il grasso e raccogliendo le briciole. Alcune spirochete, errando e infiltrandosi, avevano probabilmente un'attività patogena nei riguardi dei batteri con i quali entravano in contatto. Altre dovevano essere totalmente innocue.

Spirochete libere saprofaghe sono ben note ancora oggi, così come lo sono molte varietà impegnate in relazioni simbiotiche o parassitiche con altri organismi, per esempio insetti, molluschi e mammiferi, uomo incluso. Alcune vivono senza provocare alcun danno sulle nostre gengive; altre, come *Treponema pallidum*, si possono identificare nel sangue di soggetti affetti da sifilide.

Le spirochete tendono ad attaccarsi a oggetti, siano esseri viventi o no. Quando nuotano l'una vicino all'altra, tendono anche ad avere un movimento ondulatorio all'unisono, dovuto semplicemente alla loro vicinanza in un ambiente liquido. Le spirochete saprofaghe localizzate alla superficie di un ospite, di cui si nutrono, possono spingere quest'ospite attraverso il

mezzo, con movimenti ondulatori coordinati, particolarmente se sono ammassate da un solo lato.

Le spirochete e i protisti che erano riusciti a sviluppare insieme raffinati sistemi di attacco potevano nuotare bene; di conseguenza, trovavano anche una maggiore quantità di cibo e si riproducevano con una frequenza superiore, il che costituiva un netto vantaggio. La selezione naturale avrebbe indubbiamente favorito questo tipo di alleanze fino a quando i due partner non fossero diventati gradatamente un unico individuo. Per esempio, quando il cibo è abbondante, una certa ameba moderna ritrae il proprio undulipodio e si rimpinza, muovendosi lentamente nell'ambiente circostante e dividendosi con indolenza, secondo il tipico modo delle amebe. Quando, invece, il cibo diventa scarso, sviluppa un cinetosoma e un undulipodio e si allontana nuotando alla ricerca di cibo.

Due milioni di anni or sono, con l'avvento delle alleanze tra spirochete e altri organismi deve essersi verificata un'alterazione del microcosmo, pari a quella che la scoperta della macchina a vapore produsse nella civiltà umana. I nuovi eucarioti, in grado di muoversi, devono aver rivoluzionato il mondo batterico con la spinta improvvisa data ai sistemi di trasporto e di comunicazione. Il traffico cellulare e, pertanto, il flusso dell'informazione genetica subirono un'accelerazione. E, così come la macchina a vapore accelerò i cicli di produzione industriale, tra cui anche la fabbricazione di altre macchine a vapore, le associazioni tra spirochete e altri organismi hanno probabilmente avviato un incremento dello sviluppo, accrescendo il numero e la diversità delle forme di vita simbiotica.

Certamente, lo sviluppo di buoni sistemi di attacco nelle spirochete simbionti causò un forte incremento della speciazione microbica. Oggi esistono circa 8000 specie differenti di protisti unicellulari a vita libera: sono i ciliati. Ogni specie di ciliato si riconosce per il caratteristico numero di motivi formati dalle ciglia sulle superfici dei suoi membri e per il modo in cui questi motivi sono raggruppati. In verità, i motivi formati dalle ciglia sulle superfici di alcuni microbi possono essere ereditati indipendentemente dai geni che sono contenuti nel nucleo cellulare. Se, con un intervento microchirurgico, viene rimossa una

zona della superficie cellulare e questa zona viene poi reinserita capovolta, la nuova disposizione delle ciglia sarà ereditata direttamente dalle cellule figlie dopo la divisione. Anche questo fatto sottintende un'origine indipendente per gli undulipodi.

Per il fatto di essere mobili, le spirochete attuali entrano esse pure facilmente in simbiosi con altri microrganismi. Nell'intestino di una termite australiana vorace vive *Mixotricha paradoxa*, un protista che appare rivestito da ciglia. Solo quattro di queste, all'estremità anteriore, risultano essere undulipodi genuini con una struttura 9+2, e non prendono parte al movimento dell'individuo. Il resto delle "ciglia" è costituito in realtà da 500000 spirochete del genere *Treponema*, che sono attaccate alla superficie del protista, ondeggiano all'unisono e si alimentano tutte assieme. I quattro piccoli undulipodi servono esclusivamente come timoni che permettono a *Mixotricha paradoxa* di cambiare direzione.

Le termiti brulicano di microbi simbionti, senza i quali morirebbero di fame perché, pur essendo insetti xilofagi, non sono in grado di digerire la cellulosa. Esse acquisiscono però il loro contingente di batteri, indispensabile per la sopravvivenza, non attraverso i geni, ma alimentandosi del liquido anale delle compagne, attraverso un rituale caratteristico. Le spirochete, nuotando da sole e in massa, fanno avanzare le particelle alimentari, reciprocamente le une per le altre, e i microbi più grossi all'interno dell'intestino posteriore delle termiti, che appare rigonfio. Inconsapevoli del vasto mondo degli organismi più grossi che è all'esterno delle termiti stesse, esse godono di un abbondante rifornimento di cibo e di una protezione contro l'ossigeno.

Uno dei misteri più fitti della natura è come le cellule abbiano fatto a procurarsi nel loro interno i microtubuli delle spirochete e a costruirsi da essi un brillante apparato per il movimento organizzato. Sono stati scritti volumi interi sul sistema microtubulare intracellulare. E con buone ragioni: infatti, i microtubuli sono interessati nella secrezione cellulare, nella divisione cellulare e nella formazione delle cellule nervose. Pertanto, essi fanno parte della storia del cancro e dello sviluppo

del cervello. Moltissimi ricercatori, tra le migliaia che lavorano sui microtubuli presenti nei nervi, nel cervello, negli spermatozoi e nei protisti ciliati, isolandone e studiandone le tubuline, non cessano mai di chiedersi da dove, in senso evolutivo, abbiano avuto origine i microtubuli. Posti di fronte all'ipotesi dell'origine dalle spirochete, potrebbero rispondere come ha fatto Michael Sleigh, professore di biologia a Southampton, in Inghilterra: «I sistemi di microtubuli si sono probabilmente sviluppati per sostenere dei prolungamenti cellulari e per orientare, e forse azionare, la circolazione vacuolare... Una tale origine... sembra più probabile di un'origine simbiotica dalle spirochete...»[28] Una simile argomentazione ignora, tuttavia, il principio fondamentale che l'evoluzione non programma mai in anticipo. Il fatto che le cellule abbiano bisogno di microtubuli e di undulipodi non significa che esse li abbiano fatti evolvere per sé. D'altra parte, microrganismi affamati che, dimenandosi si attaccano per propri scopi alle cellule, diventandone simbionti, avrebbero potuto diventare, senza alcuna pianificazione preliminare, il sistema ciliare di quelle cellule. Avrebbero potuto farlo, obbedendo alle stesse regole dei vecchi intrecci in cui si assiste a un violento attacco, seguito da un compromesso e, infine, da una coalizione tra vincitore e vinto. Nella loro frenetica ricerca di cibo, le spirochete non divorarono le loro vittime ma, al contrario, conferirono loro la possibilità di muoversi rapidamente. Il fatto che residui di spirochete compongano il sistema di microtubuli in tutti gli eucarioti e che il comportamento delle spirochete prigioniere sia il denominatore comune di molte funzioni elaborate è oggi un'ipotesi suggestiva.

La prestazione più interessante dei microtubuli potrebbe essere la complicata "danza dei cromosomi", cioè la mitosi, dato che questo metodo di divisione cellulare ha portato, tra le altre cose, alle cellule animali, alle *nostre* cellule. È proprio questo rituale intracellulare, più complesso di qualsiasi balletto, a trasformare l'uno in due. Quando stanno per dividersi, i cromosomi di una cellula si raddoppiano. I due cromosomi di ogni coppia formatasi sono uniti in un punto particolare di tutta la lunghezza del cromosoma mediante un piccolo disco, il *cineto-*

coro, una specie di bottone o di uncino che connette i cromosomi ai microtubuli. Due poli, come il polo nord e il polo sud terrestri, sono contrassegnati nelle cellule animali da piccoli corpi, i *centrioli*. Un insieme di fibre si apre misteriosamente a ventaglio tra di essi e forma un fuso. A un esame più accurato, le fibre appaiono costituite da centinaia di microtubuli. Dopo essersi duplicati, i cromosomi si allineano lungo l'equatore della cellula e ciascuno risulta attaccato a una fibra del fuso mediante un cinetocoro. Si duplicano, quindi, anche i cinetocori, liberando ogni membro della coppia di cromosomi. I cromosomi, purché rimangano collegati ai microtubuli, si separano e si portano ai poli opposti. Attorno a ogni gruppo di cromosomi si forma una membrana che delimita così due nuovi nuclei; alla fine la cellula si divide in due

Questa sorprendente, maestosa pavana assicura la duplicazione esatta e la suddivisione del materiale genetico tra cellule figlie: una vera prodezza, considerando che le cellule nucleate generalmente hanno una quantità di DNA migliaia di volte superiore a quella dei batteri. Come abbiamo già visto, tutte le molecole di DNA di tutte le nostre cellulè, distese e unite per le estremità, raggiungerebbero la Luna dalla superficie terrestre e tornerebbero indietro, ripetendo il medesimo percorso oltre un milione di volte; eppure questo stesso DNA, specialmente quando deve spostarsi durante la divisione cellulare, rimane ben compattato all'interno dei cromosomi. Nel cercare di immaginare come si sia svolto questo processo, giova ricordare che le pressioni di selezione devono essere state implacabili: il destino delle cellule prive di geni e di quelle con un corredo di DNA incompleto fu quello di soccombere.

Ma la complessità della danza mitotica diventa ancora più comprensibile se si considera la possibilità che esista una spirocheta con funzione di coreografo. E vi sono indizi in questo senso. Il fuso mitotico consta di microtubuli, gli stessi che si trovano in tutti i flagelli cellulari. I centrioli localizzati ai poli della cellula sono composti delle stesse strutture a forma di disco combinatore telefonico: cioè di nove triplette di microtubuli, disposte a cerchio. I centrioli sono, in effetti, identici ai cinetosomi, con un'unica differenza di natura tecnica: non

hanno flagelli. Ma in molti organismi, non appena conclusa la divisione cellulare, essi riescono a trasformarsi rapidamente in cinetosomi emettendo flagelli (undulipodi).

La scansione temporale secondo la quale si svolgono i processi cellulari mette sulla strada giusta per capire i ruoli differenziati che le spirochete hanno sostenuto nel corso dell'evoluzione. Nelle piante e negli animali, undulipodi e mitosi si escludono a vicenda, cioè non si notano mai nella stessa cellula e nel medesimo momento. Pare che le cellule fungine abbiano ceduto in permanenza i loro flagelli in cambio della mitosi. Per potersi dividere, alcuni protisti devono innanzitutto ritrarre gli undulipodi entro le loro cellule. Nessuna cellula di mammifero (per non citare vari altri tipi di cellule) può conservare gli undulipodi mentre si divide per mitosi. È come se la cellula dovesse utilizzare le sue antiche spirochete simbionti per l'una cosa o per l'altra, ma non per tutte e due insieme.

Come i personaggi dei fumetti, che cercano di scoprire la vera identità di un supereroe mascherato, gli scienziati hanno notato che le due strutture microtubulari non si trovano mai insieme nella stessa "stanza"; non sono però ancora riusciti a dimostrare che esse siano un'unica e identica cosa. Così noi non possiamo dimostrare che il fuso mitotico e gli undulipodi siano il medesimo vestigio di spirochete mascherate, ma, in realtà, i dati fanno pensare a un'unica identità biologica.

Sfortunatamente lo scienziato non può vedere i corpi delle spirochete che si dimenano all'interno della massa citoplasmica e che si dividono direttamente come altri organelli, per esempio i cloroplasti e i mitocondri. Al contrario, vede solo quelle strutture che sono note come sistemi organizzatori dei microtubuli, minuscoli centri visibili al microscopio elettronico e che precedono la crescita dei singoli microtubuli, dei centrioli, dei cinetosomi e degli attinopodi. Molti biologi si sono chiesti perché la cellula si "agiti" tanto per produrre elaborati dischi combinatori di apparecchi telefonici e, pertanto, hanno definito la questione dei centrioli un "enigma centrale" della biologia.[29] Ma, se la teoria delle spirochete simbionti è esatta, tutte le strutture 9+2 devono essere considerate vestigia evolutive e i centri di organizzazione dei microtubuli sarebbero,

dunque, i resti effettivi di popolazioni di spirochete, che sarebbero state "adottate" in passato dalle cellule ospiti

Quando le comunità microbiche, diventando eucarioti, acquisirono per la prima volta l'acido nucleico dalle spirochete che le avevano invase, è probabile che lo abbiano utilizzato soltanto per controllare la produzione di ulteriori spirochete, allo scopo di dare un impulso alla comunità. Le comunità invase, una volta diventate nuove cellule, adottarono invece i geni delle spirochete per coordinare la suddivisione di tutto il loro ingombrante materiale genetico. Il risultato di quest'adozione entro le nuove cellule fu spesso un'assenza di undulipodi e, quindi, di motilità all'esterno.

Oggi tutti i funghi e le alghe rosse marine, molte amebe, le alghe verdi e molti altri eucarioti conservano la mitosi, ma non gli undulipodi; questi esseri mostrano quanto sia auspicabile un sistema interno raffinato per il trasporto dei cromosomi nel corso della riproduzione e, nel contempo, quale problema sia possedere nel medesimo momento un simile sistema e undulipodi esterni. Essi non hanno mai risolto la contraddizione essenziale che sta nel conservare sia l'equipaggiamento interno per il movimento dei cromosomi sia i flagelli cellulari che sporgono all'esterno della cellula, entrambi basati su un sistema di microtubuli. In ogni forma di riproduzione, era più importante che si muovessero i cromosomi e, pertanto, gli undulipodi andarono perduti.

Un dilemma che permise di raccogliere una vasta gamma di soluzioni sperimentali, adottate dalle diverse forme di vita, fu come conservare la divisione mitotica senza sacrificare il moto dei flagelli cellulari. Un buon numero di soluzioni ebbe un tale successo da poter sopravvivere fino ai giorni nostri. Alcuni organismi, per esempio, acquisirono sia la mitosi sia la motilità, ma in stadi differenti dei loro cicli vitali. I ciliati poterono conservare centinaia di undulipodi (ciglia), suddividendo i propri nuclei con metodi diversi dalla mitosi normale. Altri organismi ancora, alcuni dei quali, alla fine, diedero origine alle piante, formarono undulipodi soltanto durante lo sviluppo degli spermatozoi. La motilità della coda degli spermatozoi è dovuta al fatto che questa parte della cellula spermatica è costituita da

undulipodi; per tale motivo gli spermatozoi non possono mai dividersi per mitosi; sono destinati solo a fecondare le uova, le quali, potendosi dividere, non possiedono mai undulipodi.

Probabilmente, su questi temi, sono comparse e si sono dissolte nel nulla migliaia di variazioni. È questo il modo in cui si comporta la natura con soluzioni così perfette da non lasciare alcuno spazio a ulteriori perfezionamenti: le fa giungere spesso a una morte prematura. Gli organismi che si sono dati da fare per conservare sia la motilità sia la divisibilità in seno a una singola cellula sono rimasti per la maggior parte fino a oggi cellule singole.

Lo stadio che doveva conseguire un successo così spettacolare era quello che lasciava aperto il maggior numero di possibilità: comparvero così organismi che avevano sviluppato un undulipodio, ma nel contempo avevano una cellula attaccata alla precedente che poteva ancora dividersi. Quell'unico undulipodio fungeva quindi da propulsore per entrambe le cellule.

Quest'innovazione aprì la via per raggiungere nuove vette nella complessità strutturale. Essa diede origine per evoluzione a organismi che possedevano una cellula germinale e un corpo: una cellula germinale con l'unico scopo di partecipare alla riproduzione e un corpo pluricellulare estremamente differenziato per svolgere una miriade di funzioni specifiche. Questo è, in realtà, il piano fondamentale secondo cui sono costruiti i nostri corpi. Le nostre cellule germinali, cellule uovo e spermatozoi, sono le uniche cellule che possano riprodurre un essere umano, anche se ogni cellula corporea contiene una copia di tutti i nostri geni.

Nella regolazione genica, il corpo si comporta in maniera totalitaria. Per esempio, una volta che una cellula diventa una cellula muscolare, rimarrà tale per sempre. L'unica eccezione a questa regola dei ruoli permanenti all'interno del corpo ha luogo nel cancro, quando sembra che le cellule ritornino allo stato primordiale, in cui si riproducono ininterrottamente senza tener conto né della posizione, né della funzione che svolgono nell'organismo. Nel cancro, i cromosomi si frammentano e i mitocondri si riproducono ancora più rapidamente delle cellule di cui fanno parte. In generale, una volta che una cellula si

impegna a sviluppare un undulipodio, cessa di esistere dal punto di vista evolutivo: non può più riprodursi. Ma alcune cellule neoplastiche in coltura, come se disobbedissero a ogni forma di autorità, possono sviluppare undulipodi per poi perderli proprio prima della mitosi. È come se si dissolvessero i legami precari che tengono unite le associazioni simbiotiche, impedendo alle cellule di disintegrarsi. I simbionti rompono le righe, riaffermando ancora una volta le loro tendenze all'indipendenza e rivivendo il loro antico passato. Le ragioni, naturalmente, non sono proprio del tutto chiare, ma il cancro sembra più una regressione intempestiva che una malattia. I geni sono soggetti a regolazione e le cellule si differenziano all'interno dell'organismo grazie a un'interazione complessa tra sostanze biochimiche. Quando queste sostanze vengono diluite come conseguenza dell'introduzione di nicotina, di nitrato di sodio e di altri cancerogeni, non possono svolgere il loro compito. Di conseguenza, le cellule tendono a comportarsi come i bambini in una classe lasciata senza insegnante: creano una grande confusione, abbandonano il loro posto, si comportano in modo sregolato e gratuito.

Si dimentica facilmente che la simbiosi è ancora in atto oggi nell'insieme della flora e della fauna. Per esempio, le spirochete stanno ancora tentando di vivere alle spalle dei loro partner e delle loro vittime. Quelle simbionti si comportano come undulipodi e i veri undulipodi funzionano come se fossero organismi indipendenti. Undulipodi tagliati via dalle rispettive cellule spermatiche, cioè le code isolate degli spermatozoi, una volta distaccati dal corpo cellulare principale, si allontanano nuotando e sopravvivono così per minuti o addirittura per ore. D'altro canto, spirochete integre possono attraversare la parete cellulare dei protisti e penetrare nel loro "santuario" interno, dove continuano a nuotare di qua e di là. Talvolta, durante quest'enigmatica missione che svolgono dentro la cellula, si riproducono. Che cosa facciano esattamente non è chiaro, a meno che tutto ciò non serva a dimostrare, agli osservatori umani, essi stessi sopravvissuti agli incontri e agli scontri tra batteri, come la Storia si ripeta.

O forse si dovrebbe dire che la Storia si ripiega su se stessa, dato che, dentro l'occhio che scruta al microscopio, minuscoli coni e bastoncelli (le cellule nervose, o neuroni, specializzate per la percezione della luce) reagiscono alla luce e l'uno all'altro, inviando al cervello messaggi chimici ed elettrici lungo gli assoni e i dendriti, cioè lungo le appendici filamentose dei neuroni. Le sezioni trasversali sia dei coni sia dei bastoncelli rivelano un tipo di disposizione 9+2 dei microtubuli. Assoni e dendriti sono, invece, una massa di microtubuli, organizzata in modo diverso e contenente tutte le proteine microtubulari, senza tuttavia la disposizione 9+2. Qualcosa negli occhi innesca onde di trasmissione attraverso le sinapsi che si sono instaurate tra gli assoni e i dendriti, fittamente ammassati, dei neuroni cerebrali. Cavalca queste onde il seguente pensiero: «Il sistema di motilità del microcosmo, basato sulle spirochete, si è evoluto in seno all'ambiente ordinato degli organismi di maggior mole per diventare la base dei loro sistemi nervosi?»

Le prove circa l'identità delle spirochete nei neuroni cerebrali, oltre alla notevole presenza in questi di microtubuli (neurotubuli), si stanno lentamente accumulando. Le tubuline alfa e beta sono le proteine solubili più abbondanti nel cervello. Due o tre proteine presenti nelle spirochete che vivono all'interno delle termiti hanno affinità immunologiche sia con esse sia con quelle che sono presenti in tutti gli undulipodi. Raggiunta la maturità, le cellule cerebrali non si dividono più e non si spostano. Sappiamo però che i neuroni cerebrali dei mammiferi (la fonte più ricca di tubulina in assoluto) non sprecano il loro ricco patrimonio in microtubuli, ma al contrario, raggiunta la maturità, una volta riprodottisi e sistematisi, svolgono come unica funzione quella di inviare segnali e di riceverne, come se i microtubuli, un tempo utilizzati per il movimento degli undulipodi e dei cromosomi fossero stati sottratti alla loro normale funzione e sfruttati, invece, per la funzione mentale.

Nello spiegare il processo mentale in una lettera a Jacques Hadamard, Albert Einstein scriveva che, per esplorare il mondo fisico, egli si serviva di simboli non verbali, un linguaggio

astratto fatto di "elementi riproducibili". Spiegando come era giunto alle sue scoperte spettacolari, diceva: «Non sembra che le parole, o il linguaggio, scritte o parlate, svolgano alcun ruolo nel meccanismo del pensiero. Le entità psichiche che, apparentemente, servono come elementi del pensiero sono certi segni e immagini più o meno chiare, che possono essere "volontariamente" riprodotte e combinate.» Einstein proseguiva asserendo che, per lui, non esisteva alcuna differenza essenziale tra «mera associazione o combinazione di elementi riproducibili e comprensione (in sé).»[30] Se le spirochete sono davvero antenate delle cellule nervose, o neuroni, cerebrali, i concetti e i segnali del pensiero si basano, dunque, su capacità chimiche e fisiche già latenti nei batteri. Gli "elementi riproducibili" del cervello di Einstein potrebbero averlo preceduto in una forma diversa, prosperando tre miliardi di anni or sono nell'ambiente anaerobico della Terra primitiva.

Einstein riteneva che il processo mentale procedesse grazie a «un'interazione piuttosto vaga con gli elementi sopra menzionati». Considerandolo da un punto di vista psicologico, egli così riepilogava: «... quest'azione combinatoria sembra essere l'aspetto essenziale del pensiero produttivo, prima che vi sia una qualsiasi connessione con la costruzione logica nelle parole o in altri tipi di segni che servono per comunicare con gli altri.» In una forma analoga, il brillante matematico John von Neumann contrapponeva gli impulsi trasmessi dalle cellule nervose implicate nel processo cognitivo nell'uomo al funzionamento dei calcolatori. Poiché le cellule nervose influivano solo sulle loro immediate vicine, e lo facevano con relativa lentezza e imprecisione, von Neumann si domandava se esse non ovviassero alla loro lentezza organica con una presenza di gran lunga più numerosa e con un'azione simultanea (in parallelo) anziché in serie, cioè con la modalità di un calcolo dopo l'altro, propria di tutti i calcolatori oggi esistenti. (Va detto però che i giapponesi stanno accanitamente tentando di produrre calcolatori in parallelo, della cosiddetta quinta generazione, che imitano più da vicino il cervello umano.) Von Neumann sospettava, inoltre, che le quattro "specie fondamentali dell'aritmetica", cioè l'addizione, la sottrazione, la moltiplicazione e

la divisione, pur essendo alla base dei calcolatori digitali, non costituissero la vera matematica del sistema nervoso. Proprio come lingue quali il sanscrito o il greco sono fatti storici e non necessità logiche assolute, von Neumann era giunto alla conclusione che, analogamente, logica e matematica fossero forme accidentali, storiche, di espressione. Quasi al termine del suo ultimo libro, *The Computer and the Brain*, annotava che «la logica e la matematica nel sistema nervoso centrale, quando venivano viste come linguaggi, dovevano essere sotto il profilo strutturale essenzialmente diverse da quei linguaggi ai quali si riferisce la nostra esperienza comune.»[31] Potrebbe il linguaggio reale del sistema nervoso essere allora una reminiscenza delle spirochete, una combinazione di RNA capace di autocatalisi e di proteine, le tubuline, entrambi simbioticamente integrate in quel circuito di ormoni, neuroormoni, cellule e loro rifiuti che noi chiamiamo il corpo umano? Il pensiero individuale è esso stesso superorganismico, cioè è un fenomeno collettivo?

Ripetutamente, lo studio del microcosmo ci dimostra che le capacità umane derivano direttamente da altri fenomeni. La natura umana ha una certa saggezza di sussunzione; i nostri atteggiamenti devono sempre essere scarni rispetto alla biosfera di cui costituiamo una parte relativamente esigua. Ma non c'è discontinuità tra noi e il cammino generale seguito dall'evoluzione, tra noi e il flusso della materia, dell'informazione e delle energie Né il pensiero umano, l'ultimo rifugio di coloro che insistono sulla "superiorità" umana, può essere isolato o dissociato dalle precedenti realizzazioni della vita. Tutte le nostre invenzioni favorite sono state realizzate in anticipo dai nostri compagni di pianeta; perché, allora, non anche il pensiero? Se la "luce fredda" dei batteri (la bioluminescenza) precedette la luce elettrica di due miliardi di anni, se il protista *Sticholonche* si muoveva nel Mediterraneo, usando come propulsori remi fatti di microtubuli, prima che le galere romane solcassero le stesse acque, se i cavalli vagavano per le pianure, le balene per i mari e gli uccelli per i cieli molto prima che si sviluppasse il traffico automobilistico, marittimo e aereo, è così inverosimile, in fin dei conti, che i simbionti batterici abbiano

creato vie di informazione biosferiche altrettanto importanti della meccanica quantistica o della teoria della relatività? In un certo senso, noi siamo "al disopra" dei batteri, perché, pur essendo composti da loro, sembra che la nostra capacità mentale rappresenti qualche cosa di più della somma delle sue singole parti microbiche. Eppure, in un senso, noi siamo "al disotto" di loro. Come minuscole parti di un'enorme biosfera, la cui essenza è fondamentalmente batterica, noi, con altre forme di vita, dobbiamo giungere fino a una specie di cervello simbiotico, che è oltre la nostra capacità di capire o di rappresentare in modo giusto.

La nostra storia umana include, nel progredire lungo il tratto di mondo che percorriamo, veri e propri balzi in avanti, che sono altrettanto sorprendenti quanto lo è il salto che dai batteri ha portato al cervello. La biologia ha prodotto tecnologia, la quale a sua volta ci ha catapultato ben oltre quelli che noi ritenevamo essere i nostri limiti biologici. Per esempio, mentre i primi esseri umani non avevano che il loro corpo come mezzo di comunicazione a lunga distanza, e se ne servivano correndo, gridando e tambureggiando, noi abbiamo accelerato i tempi passando dal cavallo-vapore, alle automobili, alle onde radio, all'elettricità e all'aerodinamica per inviare messaggi via satellite quasi alla velocità della luce.

A mano a mano che la tecnologia fa aumentare la nostra portata, ci viene sempre meno richiesto di spostare il nostro corpo per ricevere o per inviare informazioni o merci e in generale, per dare un apporto alla nostra civiltà. In passato, per esempio, dovevamo partire da casa per consegnare un messaggio a distanza. Oggi, senza lasciare il nostro domicilio, possiamo non solo telefonare, ma fare da mangiare, macinare chicchi di caffè, rispondere a chi abita di fronte a noi, far suonare l'allarme antifurto, spegnere le luci e vedere il mondo in televisione, in breve fare vita pubblica e privata senza mai lasciare la casa. Una volta, i cartografi dovevano percorrere il territorio di cui dovevano costruire la mappa. Oggi i tecnici, stando seduti a una *consolle*, ottengono le foto di un continente, scattate da un satellite, semplicemente muovendo le dita su una tastiera.

Un tempo, le spirochete microscopiche dovevano nuotare attivamente durante tutto il corso della loro esistenza. Oggi, a milioni di anni di distanza, ammassate in un organo chiamato cervello, le loro vestigia nucleotidiche e proteiche ideano e dirigono le azioni di quell'amalgama estremamente complessa di associazioni batteriche evolute, che è l'essere umano. Forse già gruppi di esseri umani, sedentari e ammassati in comunità, città e reti di comunicazione elettromagnetiche, stanno cominciando a formare un circuito che va ben oltre il pensiero, proprio come il pensiero va ben oltre il nuoto concertato delle spirochete. Non abbiamo probabilità di essere consapevoli della totalità di una simile forma di organizzazione di gruppo più di quanto i singoli componenti delle cellule cerebrali, i microtubuli, ipotetiche vestigia delle spirochete, siano consapevoli della propria missione in seno all'umana coscienza.

L'ipotesi delle spirochete, pur non essendo stata dimostrata, suggerisce una forma di simbiosi ancora più antica di quelle dei cloroplasti e dei mitocondri con le rispettive cellule ospiti, che hanno invaso. Possiamo fare risalire la simbiosi delle spirochete a un'epoca anteriore a quella in cui le cellule preda e i batteri aerobi cooperavano per produrre le prime cellule che stavano per acquisire un nucleo. Ciò accade perché oggi vi sono certi protisti, per esempio *Trichonympha*, che sopravvivono da un tempo antecedente alla comparsa di batteri aerobi e posteriore all'invasione di queste cellule da parte delle spirochete. *Trichonympha* presenta la mitosi, il che ci porta a pensare che abbia intatti i sistemi di motilità basati sulle spirochete e che, invece, manchi di mitocondri. Prima che gli aerobi si diffondessero e cominciassero a elaborare una membrana attorno al nucleo, le spirochete anaerobie stavano già proliferando all'interno delle nostre cellule ancestrali. Trascinavano i cromosomi in un sistema quasi perfetto di distribuzione riproduttiva e, mantenendo la capacità di produrre un undulipodio, conservavano la loro opzione per un nuoto cellulare rapido, un'opzione che viene esercitata ogniqualvolta le cellule spermatiche si lanciano nella loro folle ricerca di un uovo da fecondare.

Capitolo 10

L'enigma del sesso

Uno spermatozoo nuota per incontrare un uovo. Ha una coda, in realtà un undulipodio, che funge da organo propulsore, e riesce a penetrare nell'uovo grazie a modificazioni chimiche che hanno luogo alla superficie di questa cellula; quindi, come lo stadio esaurito di un razzo, l'undulipodio si stacca. Dopo che la testa dello spermatozoo è penetrata nell'uovo, il nucleo che contiene si fonde con il nucleo dell'uovo, formando un'unica cellula nucleata nuova, che possiede un numero doppio di cromosomi.

Questo processo fa parte del ciclo sessuale di organismi con sesso meiotico, la tipica forma di sesso presentata dalle cellule dotate di nucleo. Mentre, probabilmente, il sesso procariotico si è evoluto nell'Archeano, più di tre miliardi di anni or sono, il sesso meiotico, nei protisti e nei loro discendenti pluricellulari, organismi con cellule nucleate, ma diversi dai funghi, dagli animali o dalle piante, si è evoluto probabilmente alla fine del Proterozoico, all'incirca un milione di anni or sono. È certo che esso esisteva già prima della fauna di Ediacara, costituita da animali dal corpo molle e fiorente circa 700 milioni di anni or sono.

A prima (o anche seconda) vista, questo tipo di sesso appare come un intralcio superfluo e non necessario. Non ha alcuno dei vantaggi del trasferimento genetico libero dei batteri, associato con l'universale microcosmo. Nei termini economici che i biologi hanno utilizzato per descriverlo, ha un "costo" (per la

produzione di cellule sessuali speciali con un numero di cromosomi pari alla metà del numero normale, per il reperimento del partner, per la scelta del momento opportuno per l'atto della fecondazione e per la realizzazione di questo) che sembra del tutto sproporzionato rispetto a un qualsiasi possibile vantaggio.

Le piante e gli animali che si riproducono per via sessuale sono, al momento, gruppi di massimo successo: non vi è alcun dubbio in proposito. E i biologi, per spiegare l'esistenza del sesso, hanno inventato una storia esattamente in questo modo: che il sesso si conserva perché potenzia la varietà e accelera l'evoluzione. Ma noi riteniamo che le piante e gli animali complessi si siano conservati fino a oggi per ragioni che non sono direttamente correlate con il sesso biparentale. In effetti, piante e animali si sono diffusi in tutto il mondo, malgrado questo tipo di sesso.

Il sesso, in senso biologico, come abbiamo già sottolineato in precedenza, significa semplicemente unione di materiale genetico da più di una fonte per produrre un nuovo individuo. Non ha nulla a che fare con l'accoppiamento, né è intrinsecamente collegato con la riproduzione o il genere. In base a questa definizione rigorosa, il trasferimento di acido nucleico da un virus, batterio o qualsiasi altra fonte a una cellula è sesso. Il trasferimento di particelle genetiche come i virus tra differenti batteri è sesso. La fusione di due nuclei di cellule germinali umane è sesso. Perfino l'infezione di esseri umani da parte del virus dell'influenza è un atto sessuale, nel senso che materiale genetico si inserisce nelle nostre cellule. La simbiosi è come il sesso nel senso che i materiali genetici di differenti individui si congiungono per formare un nuovo individuo. Pertanto, la simbiosi viene considerata un fenomeno "parasessuale".

Nella linea evolutiva che ha condotto fino a noi, due avvenimenti distinti, che in origine non avevano alcuna relazione causale tra loro, divennero interdipendenti entro un anello di retroazione. Uno di questi avvenimenti era la riduzione del numero di cromosomi nel nucleo delle cellule figlie; l'altro era la fusione cellulare e nucleare. Entrambi i processi erano in origi-

ne eventi casuali, senza alcuna correlazione l'uno con l'altro o con la riproduzione.

Ma, alla fine, essi furono collegati e la fusione cellulare, poiché comporta il rimescolamento del DNA da fonti separate nello spazio e nel tempo, è in realtà una forma di sesso. Questo particolare tipo di rimescolamento del materiale genetico da due fonti fu associato alla fine ai meccanismi riproduttivi; si giunse così alla riproduzione sessuale biparentale che molti hanno sostenuto essere stata decisiva per l'ulteriore processo evolutivo. Noi dubitiamo, invece, che lo sia stata così tanto. È molto più probabile, invece, che le piante e gli animali, con il loro elaborato differenziamento dei tessuti e le loro forme estremamente complesse, siano stati conservati dall'evoluzione. E sembra che la complessità dei corpi sia collegata direttamente alla meiosi, al DNA, all'RNA e alla sintesi proteica che si svolgono nella divisione cellulare meiotica, durante l'appaiamento dei cromosomi, mentre solo indirettamente sarebbe collegata all'aspetto biparentale del sesso. Abbiamo bisogno della riproduzione attraverso il sesso meiotico perché i nostri antichi antenati unicellulari sopravvissero grazie a questo tipo di sesso. Essi vi rimasero così coinvolti che non poterono più riprodursi asessualmente. Incapaci di nuotare e di dividersi nel medesimo tempo, le cellule riproduttive nostre antenate furono intralciate dalle cellule somatiche a esse attaccate, condannate a morte sotto il profilo evolutivo. Ma, poiché proprio queste cellule erano le stesse che davano loro il vantaggio di nuotare rapidamente, di raggiungere notevoli dimensioni corporee, di raccogliere cibo con molta efficienza, le cellule nostre antenate rimasero coinvolte nel sesso biparentale al punto che ben presto non poterono più riprodursi senza di esso. Fin dall'inizio, l'esistenza animale comportò nella sua essenza il sesso biparentale. Ma questo non fu mai mantenuto in sé dalla selezione naturale. In verità, se il processo evolutivo potesse scavalcare il sesso biparentale (attraverso la partenogenesi nei coleotteri, la clonazione negli esseri umani, o in qualsiasi altro modo) e conservare ancora la pluricellularità complessa, non vi è dubbio che lo farebbe. Sotto il profilo biologico, la riproduzione sessuale è ancora uno spreco di energia e di tempo.

Nella vita sessuale umana (e in quella di altri animali e piante), sono necessarie due fasi complementari fondamentali per la riproduzione. In primo luogo, il numero cromosomico in alcune cellule deve ridursi esattamente della metà: un processo di divisione cellulare che viene chiamato meiosi e che dà origine o a cellule uovo o a spermatozoi. In secondo luogo, queste cellule devono successivamente riunirsi e fondersi nell'atto della fecondazione, reintegrando così il numero cromosomico normale nella nuova cellula che si forma e che si divide per diventare un nuovo individuo. I "tipi di accoppiamento" o quelli che noi chiamiamo "generi" furono, in realtà, un ulteriore perfezionamento: le prime cellule germinali erano praticamente identiche, ma con il passare del tempo si evolvettero in piccole cellule spermatiche mobili e in grosse cellule uovo stazionarie. I due tipi di cellule avevano, di conseguenza, un problema in più: quello di doversi riconoscere a vicenda per potersi unire. Oggi, tutte queste condizioni devono essere soddisfatte prima che si possa sviluppare un nuovo individuo dotato di riproduzione sessuale.

Ma vi è un enigma in tutto ciò. Perché due metà devono riunirsi per fare un tutto, il quale poi si ridividerà in due metà? Noi riteniamo che la meiosi, cioè la produzione sistematica di cellule aploidi (cellule che hanno un numero di cromosomi pari alla metà del numero normale, presente in tutte le cellule somatiche di un animale), sia stata sollecitata dall'antica minaccia che incombe sulla vita: morire di fame.

Di fronte a una simile minaccia, i protisti nostri antenati non avrebbero esitato a ricorrere al cannibalismo. In alcuni casi, la preda non sarebbe stata interamente digerita e avrebbe lasciato nell'organismo un doppio corredo di materiale genetico o, come dicono gli esperti di biologia cellulare, un corredo "diploide". In altre parole, una cellula, dopo aver divorato una cellula compagna, si sarebbe fusa con essa e una pari fusione avrebbero realizzato i nuclei delle due cellule. Un altro modo di produrre un nucleo diploide, prima che si evolvesse la fecondazione, sarebbe stato quello in cui i nuclei si sarebbero divisi prima del resto della cellula e quindi si sarebbero di nuovo fusi quando il resto della cellula non si fosse diviso. Anche

oggi, in molte cellule, la mitosi non procede regolarmente. Molti ricercatori hanno notato al microscopio cellule che compiono errori: esse cominciano a formare due nuclei per divisione, quindi i due nuclei si fondono di nuovo. La diploidia accidentale, che si verifica per fusione con la preda potenziale o con una parte di se stessi, deve sempre aver avuto luogo nel microcosmo.

Comunque si realizzasse, la diploidia fu in origine una condizione abnorme, mostruosa, ridondante. Per liberarsi da questo fardello, le cellule che rimasero coinvolte in essa dovettero progettare qualche mezzo per invertire il processo: trasmettendo solo la metà del loro materiale genetico alla prole quando si sarebbero nuovamente divise. Ciò voleva dire rielaborare il normale processo della mitosi, in cui vengono prodotte nuove cellule con lo stesso numero di cromosomi delle cellule parentali. Voleva dire sviluppare il processo della *meiosi*, in cui solo la metà dei geni parentali, solo una serie di cromosomi, avrebbe raggiunto la generazione successiva.

Nella meiosi moderna, i cromosomi simili provenienti da ogni assetto cromosomico parentale si allineano tutti insieme al centro del fuso. Se la cellula si dividesse a questo punto, con ogni cellula figlia che si prendesse la metà dei cromosomi, si formerebbero ancora una volta due cellule separate, ciascuna con una serie di cromosomi. Ma in ogni serie, prima della divisione, i cromosomi si sono duplicati, lasciando le due serie l'una a fianco dell'altra. La cellula, quindi, si divide.

I cinetocori che corredano ogni coppia di cromosomi possono ancora procedere al ritmo delle spirochete. Non sono ancora pronti a dividersi e, pertanto, quando la cellula si divide, i cromosomi che vanno con ciascuna metà risultano ancora appaiati. Infine, in ciascuna delle due cellule figlie, i cinetocori si scindono, separando i cromosomi di ciascuna coppia e portando le cellule a dividersi di nuovo, con il risultato che si ottengono quattro cellule. Ciascuna di queste quattro cellule ha soltanto una serie di cromosomi.

Lungo queste linee, in differenti genealogie di protisti, gli esperimenti si ripeterono probabilmente milioni di volte; la maggior parte delle cellule con un numero ridotto di cromoso-

mi si estinse, incapace di produrre tutte le proteine di cui aveva bisogno per sopravvivere. Le grosse cellule cannibali, alleggerendosi del doppio carico cromosomico, non potevano però anche liberarsi dei geni necessari, altrimenti sarebbero morte. Quelle cellule, invece, che divisero il loro patrimonio genetico esattamente a metà, tornarono alla condizione aploide originale, con un solo assetto cromosomico. In determinate condizioni, per esempio in caso di siccità estrema, le probabilità di sopravvivere erano maggiori con un numero di cromosomi doppio. In periodi di crescita attiva e di ricerca di cibo, lo stato aploide ancestrale era però preferibile. Ambienti in cui si alternavano differenti condizioni, per esempio le zone intercotidali in cui, ciclicamente, compariva la siccità, favorirono quegli organismi che passavano dallo stato aploide allo stato diploide e viceversa. Alla fine, alcuni organismi scoprirono che, per rimanere vitali, dovevano mantenere quest'alternanza tra meiosi e fusione cellulare. Il periodico passaggio dallo stato aploide allo stato diploide e viceversa era, inoltre, associato a una particolare capacità di diventare più complessi.

Così ebbe inizio lo strano sistema della riproduzione sessuale. Anche oggi, in molti protisti la mancanza di cibo, la siccità, il buio, la carenza di sali azotati e altre privazioni inducono fusioni cannibalistiche. Di fronte a ciò, il dividere il numero degli assetti cromosomici solo per raddoppiarlo in un secondo tempo appare uno spreco di tempo. Ma questi sprechi sono spesso l'unica via per la sopravvivenza. Diventano innati, istituzionalizzati, come in una persona che impara a conoscere un lungo percorso per tornare a casa e prende sempre quello perché non sa che ne esiste anche uno più breve. Nelle cellule animali ancestrali, la complessità accresciuta rafforzò questi inutili e seccanti percorsi collaterali. Tra quelle cellule che ciclicamente passavano dallo stato fuso allo stato originale c'erano i nostri antenati.

Dato che molti protisti e quasi tutti gli animali, i funghi e le piante presentano una qualche forma di sesso meiotico, sembrerebbe che meiosi e fecondazione si siano sviluppate precocemente nella storia delle cellule nucleate. Nei protisti che, per primi, sperimentarono il cannibalismo e un ritorno all'aploidia

era già funzionante il sistema di mitosi che si basava sulle spirochete. Ogni protista figlio riceveva una dose completa di cromosomi tutte le volte che il genitore si divideva. In qualunque linea di discendenza, una buona mitosi è il requisito essenziale per la meiosi.

Come ebbe modo di notare L.R. Cleveland, professore a Harvard, in un lavoro che svolse da solo nel 1947, bastava cambiare il momento della replicazione dei cinetocori cromosomici perché davvero si avesse un'evoluzione della meiosi dalla mitosi. Ma Cleveland, con il suo tipico accento del Mississippi e i suoi modi eccentrici, non convinse i colleghi che era riuscito a risolvere il problema dell'origine del sesso meiotico.

Fatti fortuiti, che modificano la scansione temporale degli avvenimenti, sono molto comuni in biologia. Lo stesso Cleveland ebbe modo di filmare la riproduzione in quattro cellule anziché in due, come pure un accoppiamento a tre. Egli era nettamente consapevole che il comportamento deviante delle cellule era da considerarsi nell'ambito della normalità più che un'anomalia. I suoi filmati e articoli e lo scenario che presentò per l'origine del sesso sono molto convincenti, ma quando li fece conoscere i suoi colleghi non erano ancora pronti a recepirli.

Cleveland filmò la fusione cannibalistica di protisti noti con il nome di ipermastigoti. In alcuni casi vide perfino i loro nuclei che si fondevano, anche se quasi sempre l'organismo sarebbe morto in seguito. Documentò anche variazioni nei tempi di replicazione dei cinetocori, cioè di quei "bottoni" che fissano i cromosomi ai microtubuli del fuso mitotico. Generalmente, anche queste anomalie conducevano a morte. Cleveland notò che il numero di cromosomi nelle cellule diventava anormalmente elevato. Riconobbe il sesso meiotico come una serie di avvenimenti fortuiti, che finivano per essere interdipendenti e legati l'uno all'altro. Il cannibalismo, la fusione nucleare, le variazioni intracellulari nella scansione temporale della replicazione degli organelli, i cicli ambientali che favoriscono prima l'aploidia e quindi la diploidia: tutte queste cose conducevano a morte. La sopravvivenza implicava un percorso tortuoso; bisognava diventare sessuati.

Come per altri successi evolutivi, gli organismi dotati di riproduzione sessuale probabilmente cominciarono a proliferare con velocità crescente a mano a mano che interagivano con l'ambiente e che si coevolvevano. Specie di organismi con riproduzione sessuale, oggi molto diverse, si sono ovviamente coevolute in una grande complessità. Per essere fecondato il caprifoglio deve essere visitato da colibrì e i fiori a piattaforma di aloe americana devono accogliere i pipistrelli che volano di notte. I fiori di asclepiade ospitano le larve del monarca (*Danaus plexippus*) mentre maturano.

Per la maggior parte, gli organismi che si riproducono agamicamente e che possono produrre buone copie di sé quasi senza impiegare tempo e senza doversi preoccupare di trovare un partner, sono ancora i meglio adattati a molti ambienti. Gli organismi che si riproducono sessualmente, invece, forse in parte perché tendono a essere pluricellulari, impiegano maggior tempo a riprodursi. Ciò permette a noi e agli organismi come noi di occupare una nicchia in un periodo che è ben distinto da quello degli organismi non meiotici come i batteri. Lo sviluppo individuale impiega un maggior tempo e potrebbe essere più adatto per certe condizioni che si modificano ciclicamente. Inoltre, poiché gli animali complessi hanno un complicato programma di sviluppo dal momento del loro concepimento, con la fusione di una cellula uovo e di uno spermatozoo, essi hanno particolari disposizioni all'identità e alla morte. Salvano i loro geni potenzialmente immortali suddividendoli tra uova e spermatozoi, ma in ogni vita queste cellule si incontrano e si riproducono per formare un corpo di cellule supplementari, un corpo individuale che morirà, spesso dopo aver portato a termine una missione non richiesta come veicolo per la propagazione di quelli che sono ancora essenzialmente dei microbi. La mortalità e l'identità non dipendono tanto dal corredo di geni diversi che ereditiamo da papà e mamma, ma dal processo stesso della meiosi. La meiosi assicura che almeno una copia di ogni gene importante sia distribuita alla generazione successiva. Studi effettuati sui ciliati mostrano che un'identità complessa non viene mantenuta dall'afflusso di nuovi geni, ma dalla meiosi: cellule ciliate che si fecondano da

sé producono un individuo che è altrettanto vitale di quello che riceve i propri geni da un membro del sesso opposto. Analogamente, gli animali partenogenetici non hanno bisogno di partner sessuali. Devono, tuttavia, subire la meiosi.

La gente pensa che sesso e riproduzione siano un tutto unico. Giova, per reintegrare la giusta prospettiva, ricordare che le tre componenti della riproduzione sessuale che oggi sono unite erano un tempo separate. La riduzione numerica dei cromosomi, la fusione dei nuclei provenienti da due diverse fonti e l'associazione ciclica di questi processi nella riproduzione sessuale di individui complessi sono, in realtà, almeno tre processi distinti. Ciascuna di queste fasi è essenzialmente indipendente e tutte vengono considerate, individualmente, per i propri meriti. L.R. Cleveland ha segnalato la fusione dei nuclei di due cellule nucleate di ipermastigoti, che si erano reciprocamente fecondate. Sono anche comuni le variazioni nei tempi di replicazione dei cinetocori, i punti di attacco dei cromosomi, che potrebbero essere un altro vestigio dei sistemi di motilità basati sulle spirochete. Molti hanno citato specie dotate di un'unica serie di cromosomi, che però in certi ambienti riescono ad avere due serie. La meiosi o riduzione cromosomica e la necessità a essa complementare della fecondazione si sono evolute nei protisti forse 1200 milioni di anni or sono. In seguito, non molto prima di 700 milioni di anni or sono, si evolvette negli animali la connessione tra fecondazione e formazione dell'embrione. Lo stretto legame tra riproduzione e fecondazione comparve nei mammiferi solo 225 milioni di anni or sono. Così tutte le fasi che hanno condotto al nostro tipo di sesso (cannibalismo e fusione nucleare, variazioni intracellulari che portano a un'erronea scansione temporale delle attività delle varie parti, e variazioni ambientali cicliche che, alternativamente, favoriscono l'aploidia e la diploidia) si unirono nell'origine degli eucarioti pluricellulari.

I biologi hanno sempre pensato che il sesso permane perché fa aumentare la varietà, la novità della prole. Questa variazione, si diceva, consente agli organismi sessuati di adattarsi più rapidamente alle modificazioni dell'ambiente di quanto non

facciano gli organismi con riproduzione agamica. Ma non c'è assolutamente una prova che ciò sia vero. Quando l'affermazione venne verificata confrontando animali che possono riprodursi o agamicamente o sessualmente, per esempio rotiferi e sauri con riproduzione agamica, fu trovato che, col variare dell'ambiente, le forme agamiche erano altrettanto comuni, o ancora più comuni, delle loro controparti sessuate. Le femmine, sia di rotifero sia di sauro, producono uova fertili, che si sviluppano in femmine adulte, capaci di produrre altre uova fertili. Non si riesce a vedere alcun maschio, anche se le popolazioni di questi rotiferi e sauri sono piene di individui variabili, ben adattati alle esigenze dell'ambiente in cui vivono.

Un'altra teoria sostiene che il sesso è importante come meccanismo genetico di ringiovanimento. Essa si basa sull'osservazione che i parameci prodotti per divisione cellulare agamica sopravvivono solo alcuni mesi, mentre i ceppi che si coniugano sessualmente sopravvivono indefinitamente. Ma esiste un determinato paramecio che si oppone apertamente a questa teoria.

Paramecium aurelia ha un grosso macronucleo e due piccoli micronuclei. L'enorme macronucleo, che contiene migliaia di copie di geni, compie generalmente tutto il lavoro, producendo RNA messaggero, mentre i micronuclei diploidi non fanno nulla. Ma quando il paramecio è pronto per la coniugazione e non trova alcun partner, subisce un processo di autogamia. Ogni micronucleo diploide si divide due volte per meiosi, formando quattro micronuclei aploidi. Quindi, secondo lo stile tipicamente assurdo della natura, tutti i micronuclei aploidi tranne uno muoiono. L'unico sopravvissuto si divide di nuovo mitoticamente, per produrre due nuovi micronuclei con esattamente gli stessi geni.

Se, invece, dopo questo stadio di preparazione alla coniugazione, è disponibile un partner sessuale, ha luogo la coniugazione e uno dei due micronuclei viene trasferito nella cellula del partner in cambio di un micronucleo di quest'ultimo. Il nuovo micronucleo aploide e il vecchio micronucleo aploide si fondono, completando così il ciclo vitale. Ma se non è disponibile alcun partner, i due nuclei aploidi geneticamente identici

si accoppiano tra loro all'interno della stessa cellula. Si fondono e, alla fine, il paramecio ha un macronucleo e un micronucleo, senza però aver avuto un sesso biparentale di qualunque tipo. In questo processo di autofecondazione non sono stati introdotti nel paramecio geni nuovi. Malgrado ciò, esso è geneticamente ricaricato e ringiovanito, in grado di riprodursi di nuovo per diverse generazioni.

Tutto sommato, il nostro sesso di tipo meiotico non è poi quel grande processo che facciamo credere che sia. Certamente esso è molto meno importante per la biosfera della sessualità batterica, che è una strategia utile per la sopravvivenza immediata, grazie alla quale i microrganismi ricevono nuove componenti genetiche con altrettanta facilità di quanta ne mostrino gli esseri umani nel prendersi il raffreddore. Il ciclo vitale di *Paramecium aurelia* mostra, in effetti, che non è ricevendo geni da un maschio e da una femmina (in altre parole non è il sesso biparentale) a favorire la sopravvivenza del paramecio. È la stessa meiosi. Noi riteniamo che la meiosi, come processo cellulare, fu necessaria per l'evoluzione di animali complessi. Perfino un'accurata clonazione di singole cellule vegetali produce una discendenza molto variabile. Tenendo presente tutto ciò, sembrerebbe dubbio che il ciclo sessuale meiotico sia stato conservato negli organismi complessi perché conferisce varietà. In effetti, vi sono così tanti mezzi di variazione intracellulare (alcuni probabilmente appartenenti a precedenti simbionti), che gli organismi molto complessi hanno bisogno di qualcosa che assicuri che non ne verranno mai sommersi. Lungi dall'essere un mezzo che conferisce variazione, la meiosi è probabilmente un meccanismo di stabilizzazione.

La meiosi, specialmente quella parte di essa che comporta l'appaiamento dei cromosomi, l'uno parallelamente all'altro, e la sintesi di DNA, RNA e proteine speciali è, noi pensiamo, una specie di appello o il controllo di un inventario. Essa assicura che tutti gli assetti genici, tra cui quelli dei mitocondri e dei plastidi, siano in ordine prima che cominci lo sviluppo pluricellulare, cioè in pratica lo sviluppo dell'embrione. In fin dei conti, animali e piante ritornano a ogni generazione a una singola cellula nucleata.

Il sesso, come la simbiosi, è un'espressione di un fenomeno universale, il principio di rimescolamento e di assortimento. Due organismi, o sistemi, o oggetti, ben sviluppati e adattati si combinano, reagiscono, si sviluppano di nuovo, si ridefiniscono, si riadattano, e qualcosa di nuovo finisce per emergere. Le invenzioni umane sfruttano continuamente questo rimescolamento e assortimento. Per esempio, i semplici orologi da polso fondono l'orologio vero e proprio con il braccialetto, i carri armati riuniscono mezzi cingolati e cannoni, i sintetizzatori combinano calcolatori e pianoforti e i velivoli ad ala rotante uniscono l'elicottero all'aeroplano. Sia esso espresso come un'infezione virale, come l'unione di un'alga e un fungo in un lichene, come il cannibalismo di un'ameba, come il matrimonio tra due persone, o la fusione di uno schermo di televisore con un registratore a cassetta per ottenere una videocassetta, il principio della ricombinazione pervade tutta la vita sulla Terra. Tuttavia è la riproduzione, non la ricombinazione nel senso stretto del sesso meiotico, che prende il sopravvento.

Noi esseri umani siamo ossessionati dal sesso perché proviamo piacere quando indulgiamo in esso. Ma dietro la messinscena del sesso c'è l'imperativo cellulare della riproduzione. È la riproduzione e non il rapporto sessuale di per sé che viene realmente spronata da questa forma di retroazione positiva: la ripetizione di esperienze piacevoli può portare al rimescolamento e all'assortimento di geni, ma solo perché questo tragitto collaterale è attualmente necessario per la riproduzione dei mammiferi. Se venissero sviluppate "scorciatoie" come la clonazione per scavalcare il sesso biparentale (e fossero esse accompagnate da una retroazione sufficientemente piacevole), gli animali complessi le imboccherebbero, riproducendosi più velocemente, mentre esibirebbero ancora molta varietà. Di fatto, gli animali clonati mostrerebbero probabilmente così tanta variazione che, per poterla mantenere sotto controllo, sarebbe loro necessaria quella parte più ricca di fantasia della meiosi che consiste nell'appaiamento dei cromosomi.

Capitolo 11

Gli ultimi a sbocciare: piante e animali

Trichoplax, l'animale più primitivo oggi ancora vivente, fu scoperto nel 1965 mentre strisciava sulle pareti di un acquario a Filadelfia. È poco più di un mucchietto schiacciato di cellule nucleate, che poggia e si sposta su flagelli costituiti da microtubuli aventi una disposizione 9+2. Non sono stati trovati i suoi antenati. Lo definiamo un animale perché l'uovo è fecondato da uno spermatozoo e l'uovo fecondato forma una sfera di cellule, l'embrione. Ma, per il resto, manca di testa, di coda, di lati destro e sinistro. A prima vista, questo piccolo animale strisciante non è affatto più complesso di quella che sarebbe un'ameba pluricellulare.

La linea evolutiva che avrebbe condotto agli animali ebbe inizio nel momento in cui un protista munito di undulipodi si attaccò a un'altra cellula, agendo da organo propulsore, in modo che i microtubuli di questa seconda cellula potessero essere dirottati verso altri usi. Fu questo il punto di partenza della specializzazione cellulare, che gli animali hanno elevato ad arte suprema. Alcune cellule si misero a nuotare, altre conservarono la mitosi e la meiosi, altre ancora adibirono il loro apparato fatto di vestigia di spirochete a captare, come sensazioni, i segnali del mondo esterno. Le cellule delle antenne, le cellule dell'organo dell'equilibrio, le cellule renali, le cellule cerebrali, i recettori meccanici e le cellule olfattive non si dividono mai una volta giunte alla maturità. Ciò accade, probabilmente, perché gli impieghi speciali nei quali hanno impegnato i lo-

ro microtubuli precludono la possibilità di impiegarli nel fuso mitotico.

Un comune evento evolutivo sono quei fatti accidentali in cui le cellule figlie non si separano, ma rimangono attaccate o amalgamate tra loro. La pluricellularità dell'un tipo o dell'altro è comparsa a più riprese in molte linee di discendenza e ha portato a organismi più grossi e più complessi, basati su un piano cellulare ben riconoscibile. Le creature del microcosmo non sono affatto tutte unicellulari. I missobatteri, i cianobatteri e gli attinobatteri sono primariamente pluricellulari. I lieviti sono funghi pluricellulari e molte alghe verdi marine sono alghe pluricellulari del genere *Chlamydomonas*. Gli animali e le piante non si possono distinguere, dunque, solo sulla base della pluricellularità.

Nei protisti, la tendenza delle cellule figlie a rimanere attaccate le une alle altre ha portato alla formazione di amebe pluricellulari, come i missomiceti; di protisti algali pluricellulari, come il kelp e le alghe rosse marine; di mastigoti pluricellulari con cellule a collare, come le spugne. La pluricellularità si è probabilmente evoluta una decina di volte nei batteri e più di cinquanta volte nei protisti. Dal punto di vista attuale, tre tipi di organizzazione ebbero un successo così spettacolare come quantità e varietà che li abbiamo elevati al rango di regni: degli animali, dei funghi, delle piante.

Generalmente, le cellule di un organismo pluricellulare derivano per clonazione da un'unica cellula parentale. Ma, in alcuni organismi (per esempio nei missomiceti, nei batteri che si muovono scivolando sul substrato e nei ciliati del genere *Sorogena*), cellule provenienti da fonti diverse, ma appartenenti alla stessa specie, si aggregano. Che si ottengano per clonazione o si riuniscano provenendo da parti diverse, le cellule entrano in contatto l'una con l'altra, stabiliscono sottili interazioni tra loro e producono opere portentose, orchestrando le loro rispettive azioni: compaiono così strutture arborescenti fatte di batteri, specie di grosse limacce costituite da missomiceti, oppure strutture turrite, fatte di spore di ciliati.

Tutti e cinque i regni – batteri, protisti, funghi, piante e animali – hanno membri pluricellulari. Ma nei primi quattro di

questi regni (quindi perfino nelle piante), gli organismi pluricellulari hanno soltanto vie minime di comunicazione tra le loro cellule corporee. Nel regno degli animali, invece, la pluricellularità e le interazioni tra cellule esprimono competenza. La pluricellularità degli animali è squisitamente raffinata e organizzata. La cellula animale è dotata di un grado elevato di specializzazione ed è unita alle cellule vicine da una varietà di eleganti connessioni intercellulari: giunzioni settate, giunzioni intervallate, giunzioni serrate e desmosomi, per non nominarne che alcune. Sono proprio queste giunzioni, le cui diversità sono state rese palesi solo di recente dal microscopio elettronico, che determinano la quantità e la qualità della comunicazione tra cellule. Assieme allo stadio di blastula, la sfera di cellule che diventa un embrione, le giunzioni cellulari così particolari sono i veri segni dell'animalità.

Nel Proterozoico, circa un miliardo di anni or sono, durante il loro primitivo sviluppo, gli animali dovettero distinguersi per l'aspetto dalla moltitudine di colonie microbiche pluricellulari, di consistenza vischiosa. Dall'intensa interazione evolutiva di comunità strettamente unite emersero gruppi di cellule con un tale coordinamento reciproco e un tale controllo che ben difficilmente si riesce a immaginare che essi siano derivati da popolazioni miste di microbi estranei tra loro.

I primi antenati algali delle piante erano poco più che catenelle di cellule piene di cloroplasti, riunite in una massa filamentosa. Si sa che spore vegetali sono giunte sulla terraferma circa 460 milioni di anni or sono. (Si confronti questo dato con l'evoluzione molto più antica degli animali, avvenuta circa 700 milioni di anni or sono, anche se, per gli animali, la conquista della terraferma avvenne solo 425 milioni di anni or sono.) Possiamo ripercorrere le probabili fasi dell'evoluzione di cellule di tipo vegetale da antenati algali osservando le volvocine, una sottofamiglia di alghe verdi che vive negli stagni. Ogni cellula delle volvocine possiede due flagelli con struttura 9+2, una macchia ocellare e un cloroplasto. Le cellule che vivono singolarmente nella colonia hanno una somiglianza significativa con *Chlamydomonas*, un'alga unicellulare. Quattro cellule

di volvocine, riunite assieme a formare un disco gelatinoso stabile, vengono identificate come la specie *Gonium sociale*. Ma ogni cellula di *Gonium sociale* può liberarsi e nuotare per andare a costituire una nuova colonia.

Più complesse di *Gonium* vi sono poi specie intermedie, forme organizzate di alghe coloniali, consistenti di 16 o 32 cellule di volvocine. Il massimo grado di organizzazione è presentato da *Volvox*, una sfera cava composta da mezzo milione di cellule. *Volvox* ruota attorno al proprio asse mentre nuota e, diversamente dalle volvocine con un minor grado di organizzazione, ha solo poche cellule specializzate vicino al polo posteriore, cellule che sono in grado di dividersi e di produrre colonie figlie. Le cellule figlie si staccano dalla cellula madre singola e si muovono all'interno della sfera cava, dove continuano a dividersi, formando nuove sfere pluricellulari in miniatura. Alla fine, queste sfere liberano un enzima che scioglie la gelatina che tiene unita la sfera madre. Questa si frammenta e le nuove colonie escono in mare aperto. In questa forma di riproduzione non compare, in generale, il sesso, anche se vi sono, in realtà, alcune specie di *Volvox* che hanno una riproduzione sessuale. Sfere elaborate, di un verde traslucido, emettono uova o spermatozoi; alcune sono ermafrodite ed emettono entrambi i tipi di cellula germinale nel medesimo momento. Le cellule così liberate, simili alle alghe antenate originali, pigmentate di verde, si incontrano e si fondono assieme a cominciare dai rispettivi flagelli. Avvenuta la fecondazione, i flagelli vengono retratti all'interno dell'unica cellula derivata dalla fusione e comincia la meiosi, seguita dalla mitosi. Risultano da questi processi numerose cellule figlie, che aderiscono l'una all'altra, dando origine a nuove colonie di *Volvox*.

Le alghe risiedono in acque poco profonde, illuminate dai raggi solari. Di tanto in tanto, in passato, queste acque si prosciugarono e le alghe che poterono mantenersi umide all'interno, pur essiccandosi all'esterno, vennero a trovarsi in una condizione di vantaggio evolutivo. Sopravvissero e si moltiplicarono per diventare le prime piante terrestri, forme di vita basse, senza fusto e senza foglie, affini ai muschi e alle epatiche attuali. Non riuscirono però a sostenere il loro peso fuori dal-

l'acqua. Le alghe divennero terrestri portando con sé l'acqua: l'ambiente idrico era loro necessario perché gli spermatozoi con duplice coda potessero continuare a raggiungere a nuoto le cellule uovo. Lo sviluppo delle uova fecondate in embrioni all'interno di un rivestimento protettivo, costituito da tessuto parentale, permette di distinguere questi organismi come vere piante, piuttosto che come colonie di alghe protiste.

L'aridità rese l'ambiente terrestre ostile alle piante, così come la Luna è ostile a noi. Riuscire a non collassare o a non prosciugarsi ebbe un'importanza decisiva per i tessuti gelatinosi delle alghe. Diventare terrestri voleva dire sviluppare una struttura tridimensionale rigida, contrapposta alle precedenti forme di vita basse. Quelle prime piante, utilizzando l'ossigeno atmosferico (il vecchio prodotto di rifiuto dei cianobatteri), elaborarono nella parete cellulare un materiale nuovo, la lignina. Questa, associata alla cellulosa, dà una notevole robustezza e flessibilità ad alberi e arbusti. La solidità portò con sé lo sviluppo di un sistema, cosiddetto vascolare, per il trasporto dell'acqua dalle radici e di sostanze nutritive dalle estremità piatte dei rami, in pratica le prime foglie. Queste nuove piante "vascolari" differivano dai loro predecessori anche per avere due serie di cromosomi, invece di una soltanto, nelle loro cellule.

Quando il microcosmo si dilatò nel macrocosmo in forma di splendide piante, i microbi invisibili si dispersero dovunque. La resistenza all'essiccamento, la produzione di lignina e la conquista della terraferma comportarono probabilmente alcune simbiosi microbiche.

I biologi canadesi K. Pyrozinski e D. Malloch ritengono che le piante siano derivate da simbiosi tra alghe e funghi. Secondo loro, esse sarebbero state come licheni all'incontrario: nelle simbiosi che avrebbero condotto alle piante il partner algale, e non quello fungino, si sarebbe comportato da dominante. Probabilmente non è una pura coincidenza il fatto che il 95% delle piante terrestri attuali abbiano nelle loro radici dei funghi, la micorriza. Molte specie deperirebbero e morirebbero se fossero private dei loro partner fungini, presenti nel suolo. (La maggior parte di quel 5% di piante che è privo di simbionti

fungini permanenti è ritornata a vivere in acqua.) In effetti, la difficile conquista della terraferma sarebbe più comprensibile se fosse stata compiuta da simbionti, da partner cooperanti, che avrebbero collaborato nel fare ciò che né l'uno né l'altro avrebbero potuto fare singolarmente. E l'evoluzione discontinua, a partire da alghe ricche d'acqua e dal corpo molle a piante terrestri lignificate, suggerisce di nuovo la simbiosi.

Già 400 milioni di anni or sono, quando i primi pesci gnatostomi (muniti di mascelle) si muovevano lentamente sulla riva del mare ed erano comparsi i primissimi insetti senza ali, le piante vascolari erano in pieno rigoglio. Una sfida determinante del nuovo ambiente terrestre fu la mancanza d'acqua e una risposta a essa la produzione di semi. Un seme duraturo permette all'embrione vegetale di attendere il momento migliore per svilupparsi. Quest'invenzione può meglio essere apprezzata evocando un'analoga struttura per i mammiferi. Si provi a immaginare che cosa succederebbe se gli zigoti umani fossero rinchiusi in capsule protettive ad apertura ritardata nel tempo e attivate soltanto da un'economia in rapido sviluppo, come si ha in tempo di pace. Come sarebbe conveniente per una giovane donna poter prelevare e conservare gli embrioni, suoi futuri figli, completando il loro sviluppo solo dopo il conseguimento da parte sua di una laurea, l'acquisto di una casa e, in generale, il raggiungimento di uno stato di sicurezza riguardante il futuro. L'avvento dei semi permise agli embrioni vegetali di attendere e di controllare in silenzio l'ambiente fino a notare la comparsa di condizioni favorevoli. La fecondazione e lo sviluppo all'interno di tessuti ricchi d'acqua, appartenenti all'individuo genitore, permisero alle piante provviste di semi di prosperare malgrado l'incostanza delle piogge.

Le prime foreste contenevano gigantesche 'felci con semi' (pteridosperme), alberi che avevano l'aspetto di enormi felci, ma che, diversamente da queste, producevano semi. Per oltre cento milioni di anni, da 345 a 225 milioni di anni or sono, nel periodo in cui si evolvettero gli insetti alati, i calamari a forma di siluro e, tra altri animali, i dinosauri, le pteridosperme crebbero in un lussureggiante, tropicale splendore. Rigogliosi alberi forestali, né vere felci né vere e proprie piante con fiore (an-

giosperme), ma costituenti un gruppo a sé, le cicadofilicali, le pteridosperme si diffusero su vaste estensioni di terraferma. Ondeggiavano al caldo soffio dei venti dalle propaggini meridionali della Terra di Gondwana alle ondulate colline del Laurasia. Schiacciate nella loro parte sotterranea dalla deriva dei continenti, formarono anche la base materiale dei più ricchi giacimenti carboniferi del mondo.

Circa 225 milioni di anni or sono, le pteridosperme furono soppiantate dalle loro discendenti, le conifere, che costituirono la principale fonte alimentare dei primi dinosauri vegetariani. Queste piante "portatrici di coni", come i pini e gli abeti attuali, erano probabilmente più resistenti delle pteridosperme arboree in quanto tolleravano meglio il freddo. Si ritiene che i ghiacciai formatisi su diversi continenti 225 milioni di anni or sono abbiano offerto alle conifere diverse opportunità adattative. Le pteridosperme e altre piante che lasciarono impronte nel carbone erano in gran parte tropicali. I loro semi nudi non erano racchiusi in alcun tipo di frutto e questo è il motivo della loro grande sensibilità al freddo. Non riuscirono a superare i lunghi inverni delle epoche glaciali. Per molte specie di conifere, invece, come per le sempreverdi attuali, le temperature al disotto dello zero non presentavano un problema importante. Con un fitto intreccio microcosmico fungino a livello delle radici (talvolta emergente sotto forma di funghi mangerecci), le antiche sempreverdi si propagarono nelle lande proibite delle altitudini alpine e delle latitudini estreme, battute da bufere di neve.

Le eredi di queste conifere che tolleravano il freddo furono le piante con fiori (angiosperme), discendenti da quelle stesse primitive piante terrestri che avevano dato origine alle pteridosperme. A giudicare da certi fossili palmiformi, 123 milioni di anni or sono esse si erano già evolute e 114 milioni di anni or sono si erano ormai rapidamente diffuse in tutte le aree del mondo emerso. Le angiosperme, la miglior mostra di cloroplasti sulla Terra, si coevolvettero fin dall'inizio con gli animali. Il bouquet del corteggiatore è solo una manifestazione recente di quest'antica intimità di rapporto. Gli insetti si moltiplicavano nutrendosi del nettare dei fiori e prendevano da altri fiori

"tangenti" in cambio del servizio offerto loro con l'impollinazione incrociata. Uccelli e mammiferi arrestarono un poco questa crescita rampante divorando frutti e foglie delle angiosperme; queste, tuttavia, passarono al contrattacco, producendo tossine e allucinogeni per tenere lontani gli animali, e frutti duri (noci) e semi per proteggere gli embrioni dai succhi digestivi. Come effetto collaterale di queste contromisure protettive, si sviluppò un efficace sistema di distribuzione animale degli embrioni nascosti delle angiosperme.

Potrebbe non essere una mera coincidenza il fatto che i primi mammiferi, ovipari a sangue caldo e piccoli marsupiali, risalgano quasi esattamente al periodo in cui comparvero i primi fiori, i quali si evolvettero all'incirca 125 milioni di anni or sono. Mammiferi erbivori, dall'intelligenza vivace, offrono un altro esempio sorprendente di cooperazione nell'evoluzione, dato che il loro interesse per il cibo di origine vegetale li portò a essere, con tutta probabilità, disseminatori ben nutriti dei semi delle angiosperme. I frutti senza semi di alcune di queste piante, per esempio del banano e dell'arancio, dipendono da una strategia di dispersione che è tra le migliori della Terra: la clonazione, alla quale, una stagione dopo l'altra, ricorrono gli allevatori. Queste specie particolari vengono propagate agamicamente perché possano mantenere le loro caratteristiche organolettiche. Dominatrici sulla Terra, le piante sembrano in effetti abilissime a sedurre noi animali, avendo ottenuto con l'inganno di farci fare per loro una delle poche cose che noi sappiamo fare e che loro non sanno: muoversi.

La struttura delle piante sembra precludere l'evoluzione verso comportamenti complessi. Ma, quando andiamo a riconsiderare il loro imponente passato, cominciamo ad avere dei sospetti che le piante siano un poco meno indifese di quanto sembri. Il nostro sistema nervoso centrale e il nostro cervello si sono evoluti come un adattamento a un'alimentazione vegetale e di animali che si nutrono di piante. Le piante, loro, non hanno bisogno di cervello; prendono a prestito il nostro. Hanno un'intelligenza strategica che è insita più nella chimica della fotosintesi e nelle manovre dei geni che nella tattica della corteccia cerebrale; siamo noi a doverci comportare per loro. Che

cosa c'è dietro questa diversa saggezza delle piante? Né più né meno che l'antico microcosmo. I microbi, sotto forma di cloroplasti, di mitocondri e di quanto rimane dei sistemi di motilità fatti di spirochete, costituiscono la base del successo vegetale.

Gli animali affrontarono il passaggio dall'ambiente acquatico alla terraferma in modo un poco diverso. Forse a causa del loro patrimonio meno ricco (hanno soltanto mitocondri e i sistemi di motilità fatti di spirochete, ma non cloroplasti), impiegarono per giungere a riva 35 milioni di anni in più, pur essendosi evoluti prima delle piante.

Gli animali più antichi, essendo privi di parti dure, si conservarono in modo limitato, come impronte dell'intero corpo su arenarie; rimasti bloccati nel lontano passato su spiagge sabbiose, furono sepolti sotto la sabbia prima di essere fatti fuori dall'intraprendenza dei batteri. Questi primi animali diedero progressivamente origine a forme più grosse, globulari e vermiformi, dotate di un numero maggiore di cellule. Dopo essersi divise, le cellule rimanevano unite più a lungo. Vennero sfruttate nuove tattiche per la sopravvivenza. Alcuni animali, per esempio, utilizzarono i loro undulipodi a struttura 9+2 come ciglia, per fare convogliare le particelle alimentari, i batteri e i piccoli protisti nel proprio tubo digerente. Con il passare del tempo, sempre sviluppandosi da blastule, si evolvettero animali più grossi e in grado di procurarsi il cibo con maggiore efficienza. Alcuni di essi furono probabilmente gli artefici eccellenti dell'attuale paesaggio vivente. Secondo i parametri umani, questi non erano ancora grossi animali. Ma le loro comunità costruirono assieme le enormi scogliere coralline, mentre altri animali banchettavano a spese di quei soffici intrecci a stuoia microbici che erano così diffusi durante l'Età dei batteri. Oggi grovigli di batteri esistono solo in parti isolate e remote del mondo, non propizie per gli eucarioti, come sono gli ambienti delle zone intercotidali con un grado di salinità estrema. (Queste coste, lasciate indenni, per quanto riguarda la loro vegetazione, dai gasteropodi erbivori e, per quanto riguarda il substrato solido, dalle attività distruttive dei vermi marini – per non parlare poi dei costruttori di con-

domini – costituiscono importanti riserve per i primi abitanti del mondo.)

Le prime impronte nelle arenarie, lasciate dai più antichi animali che conosciamo direttamente, sono state trovate a Ediacara, vicino a Sydney, nell'Australia sudorientale. Animali fossili dal corpo molle, simili ai precedenti, trovati in tutte le parti del mondo e risalenti a 700 milioni di anni or sono, sono egualmente citati come "fauna di Ediacara". In questi resti si ritrovano già alcuni phyla animali che avrebbero avuto notevole successo in seguito. Il principale phylum, evolutosi dagli antichi animali di Ediacara e dai loro affini dell'emisfero australe, era costituito da vermi marini dal corpo molle e segmentato: gli anellidi. È oggetto di discussione, invece, se siano presenti a Ediacara resti di artropodi che ebbero un enorme successo (antenati di molti animali segmentati con esoscheletri, tra cui i trilobiti, i granchi, i gamberetti, le blatte e le aragoste) e di celenterati (che colpiscono la preda con tentacoli contenenti ghiandole velenose e sono dotati di undulipodi sviluppatissimi, che raggiungono anche il millimetro di lunghezza). Certamente molti animali oggi estinti erano presenti allora.

Altri importanti gruppi di animali senza uno scheletro interno, come gli echinodermi (il phylum a cui appartengono le stelle e i ricci di mare), dovevano esistere già 700 milioni di anni or sono, ma, essendo privi di parti dure, non è facile riconoscerli con certezza fino a 560 milioni di anni or sono. Siamo comunque fortunati che molte forme dal corpo molle si siano conservate bene in mezzo a violenze e tumulti della storia geologica. La fauna di Ediacara, portata all'attenzione del mondo scientifico per la prima volta da Martin Glaessner, professore di geologia all'Università di Sydney, in Australia, è stato un ritrovamento elettrizzante, come scoprire delle rovine in un deserto spazzato dal vento o imbattersi all'improvviso negli antichi templi khmer della giungla cambogiana. Oggi noi comprendiamo molto più chiaramente il grande "ritardo" con cui compaiono gli animali tra i reperti fossili. Animali dal corpo molle, di notevole complessità, hanno preceduto animali con parti dure, proprio come la gente mite, capace di produrre manufatti di grande complessità, precedette i cavalieri racchiusi

nelle loro rigide armature. I primissimi animali (società insignificanti di cellule, creature che ricordano le spugne e forme antiche, simili a *Trichoplax*, di gran lunga meno complesse degli animali di Ediacara) non devono mai aver subito il processo di fossilizzazione. I discendenti di queste prime comunità animali, per esempio *Trichoplax*, sono creature così ricche d'acqua, delicate, rare e generalmente poco appariscenti da sottrarsi a ogni indagine ancora oggi. I più antichi animali, come la maggior parte dei protisti, privi di parti dure o di scheletri interni, si disintegravano completamente dopo la morte. I loro discendenti strutturati, invece, riuscirono a utilizzare calcare e silice per formare splendide conchiglie e scheletri, lasciando così ai posteri una dovizia di indizi sulle prime forme di vita del nostro Fanerozoico.

L'inizio del Cambriano, circa 580 milioni di anni or sono, rappresenta l'avvento dell'era moderna, il Fanerozoico, in cui noi viviamo. Fossili del Cambriano appaiono con tale chiarezza e abbondanza in tutto il mondo che per molto tempo si è ritenuto che la vita fosse sorta solo allora. Fino a quando, negli ultimi vent'anni, venne rivelato il microcosmo fossile, le rocce più antiche venivano ammassate in un periodo di tempo enigmatico ed enorme, il Precambriano, che partiva dall'origine della Terra. Oggi sappiamo che la vita non ebbe inizio con i trilobiti e animali simili, ben sviluppati, del Fanerozoico. Ciò che comparve per la prima volta nel Fanerozoico furono gli scheletri; si ebbe ugualmente lo sviluppo di conchiglie, di rivestimenti rigidi e di altre parti dure che proteggevano dalle onde e dai predatori. Tutto ciò ebbe come effetto secondario che, nella documentazione fossile, rimase, degli animali, una notevole traccia.

Molti naturalisti europei del XVII e XVIII secolo chiamarono certi fossili dalla configurazone complessa "pietre figurate". Alcuni li consideravano "forme" animali prodotte di continuo nel sottosuolo ed emergenti a mano a mano in superficie, mentre altri sostenevano che, forse, così risalivano al Diluvio Universale. Per esempio, John Woodward, professore di fisica al Gresham College di Londra, riteneva di poter stimare, sulla base dei fossili vegetali ritrovati in Inghilterra, esattamen-

te quando, nel corso dell'anno, il Diluvio Universale avrebbe avuto luogo. Come scrisse nel 1685: «... di tutte le varie Foglie, che ho visto finora, incluse nella Pietra, non ne ho osservato alcuna in un diverso Stato, né ho visto Frutti in uno stadio più avanzato della Crescita, e verso la maturità, di quanto non fossero avvezzi a essere nella seconda parte della Stagione primaverile.» «I Coni di Pino», disse ancora in un altro lavoro, «sono nello Stadio primaverile; così come lo sono tutti gli Ortaggi, e i giovani Baccelli. Giunse il Diluvio, alla fine di Maggio, e tutta l'ulteriore crescita fu bloccata.» In pieno Ottocento, i fossili (a dire il vero, tutta la natura) furono interpretati in un contesto biblico e studiati con l'occhio intento a verificare la parola di Dio. Ma il naturalista francese Georges Louis Leclerc de Buffon, l'inglese Erasmus Darwin (nonno di Charles) e più tardi l'evoluzionista francese Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet de Lamarck, l'autore e artista inglese Samuel Butler e altri avevano già cominciato a considerare in modo diverso quelle pietre. Il direttore della 'London Encyclopedia', Robert Chambers, propose anonimamente, nella sua opera *Vestiges of the Natural History of Creation*, scritta nel 1844, che Dio non avesse creato le specie separatamente e le supervisionasse attivamente, ma piuttosto che egli avesse creato la vita sulla Terra una volta soltanto, all'inizio, e poi le avesse lasciato seguire il suo corso naturale.

Nuove idee sulla vita sfociarono dal mutato modo di pensare Dio. Charles Darwin, un uomo che aveva scritto all'inizio di non avere «il minimo dubbio sulla rigorosa e letterale verità della Bibbia», si chiedeva più tardi: «Gli icneumonidi riducono le loro prede a pezzi: come avrebbe potuto un Dio benevolo volere questo?» Nel 1844, Darwin scrisse a un collega, il botanico Joseph Hooker: «Alla fine, mi sono giunti balenii di luce e sono praticamente convinto (contrariamente all'opinione da cui sono partito) che le specie non sono (è come confessare un delitto) immutabili.»[32] Allorché, alla fine dell'Ottocento, la teoria dell'evoluzione biologica divenne un fatto noto, i fossili del Cambriano vennero talvolta reinterpretati come se rappresentassero la prima creazione generale delle cosiddette forme inferiori di vita. Con la scoperta di fossili di batteri, di protisti

e della fauna di Ediacara, però, divenne evidente che l'"improvvisa comparsa" della vita nelle rocce del Cambriano era un'illusione dovuta al fatto che, in quel periodo geologico, gli animali avevano cominciato a proteggere il loro corpo con un rivestimento resistente. I nostri antenati erano vissuti per circa 3 miliardi di anni prima di formare gusci e scheletri esterni, visibili a occhio nudo.

Le prime parti dure degli animali, che risalgono a circa 580 milioni di anni or sono, erano costituite di fosfato di calcio e di un materiale organico, la chitina. Questa fu utilizzata sia dai trilobiti sia da un'altra linea rampante di artropodi del Cambriano, gli euripteridi. Questi "scorpioni di mare" giganteschi, che superavano talvolta i tre metri di lunghezza, sono oggi totalmente estinti. Altre forme del Cambriano includevano i brachiopodi, organismi molto simili ai bivalvi. Questi animali sono oggi quasi tutti estinti; i nuotatori subacquei possono, tuttavia, vederne ancora alcuni lungo la costa nordamericana che affaccia sull'Atlantico.

Forse i fossili più famosi del Cambriano sono quelli del Burgess Shale, trovati nel 1910 dal geologo Charles Walcott vicino a Field, nella Columbia britannica. Walcott riunì una squadra di uomini per far saltare con la dinamite un'area prescelta e poté così mettere in luce un metro circa di spessore di scisto estremamente fossilifero, che aveva costituito il fondale fangoso di un mare da tempo prosciugatosi. Oggi quelle antiche distese si trovano su un passo di montagna nelle Cascades, una catena montuosa che si estende dagli stati di Washington e dell'Oregon fino al Canada occidentale. Nel decennio successivo, Walcott e i suoi collaboratori raccolsero circa 35000 esemplari fossili, molti dei quali si trovano attualmente alla Smithsonian Institution a Washington, D.C.

Quasi tutti i fossili del Cambriano appartengono a uno o all'altro dei trenta o più phyla in cui vengono classificati gli animali attuali. Nella letteratura paleontologica vengono lasciati e descritti senza classificarli solo pochi organismi enigmatici (spesso raccolti sotto l'etichetta scientifica di "Problematica").

Un gruppo molto diffuso di fossili, che si trovano in grandi quantità nelle rocce del Cambriano inferiore e poi attraverso

tutte quelle del Cambriano medio, è costituito dagli archeociatidi. Si tratta di strutture scheletriche a forma di cono, che, riunite in grandi comunità, dominarono i mari tropicali. Questi esseri coniformi, di consistenza litica, sono ignoti oggi sotto qualsiasi parvenza e pertanto, come capita in un campo in cui manchi l'informazione, le congetture si accavallano senza limite. Erano coralliformi, o spugnosi nell'aspetto, oppure non erano neppure animali? Qualunque cosa fossero, gli archeociatidi scomparvero improvvisamente nel Cambriano superiore, cioè nella sua parte più recente. Tutte le loro numerose famiglie, i generi e le specie si estinsero meno di 80 milioni dopo la loro prima comparsa. Dei loro fossili sono note localizzazioni in Inghilterra, Siberia, Canada e altrove.

Sono noti anche altri esempi di stravaganza biologica, di specie fantasma scarsamente documentate da reperti fossili incompleti. "Cose" che sembrano minuscole incisioni nel calcare sono note come stromatoporoidi. Almeno un paleontologo sostiene che, data la loro comparsa alla fine del Cambriano e la loro persistenza in buona parte del resto dell'Era paleozoica, dovevano costituire ampie distese di cianobatteri. Altri studiosi ritengono che gli stromatoporoidi fossero comunità di spugne o di animali simili a esse. Così nessuno sa con certezza se queste creature problematiche erano batteri o animali o né l'una cosa né l'altra.

La maggior parte della gente, se potesse passeggiare lungo le spiagge del Cambriano e osservare il mare invece dei bassi, fitti grovigli di microrganismi, attaccati alla riva, non noterebbe davvero una grande differenza tra la fauna di mezzo miliardo di anni or sono e quella di oggi. Le differenze secondarie tra le forme di vita marina sono comunque una questione di esoterismo tassonomico. Inoltre, certi organismi come il limulo non si sono modificati affatto dal Cambriano a oggi. I limuli sono un genere di artropodi. A Capo Hatteras e a Capo Cod la progenie degli antichi limuli del Cambriano vive lungo la costa che si affaccia sull'Atlantico. Uniti in un amplesso, immobili, oppure lentamente e singolarmente vaganti in direzione dell'acqua, o ancora a dorso in giù e agitando le zampe, essi appaiono oggi esattamente come erano 400 milioni di anni or sono.

A un occhio attento e a una mente ricettiva, però, un'immersione nel Cambriano offrirebbe senza alcun dubbio delizie peculiari; l'immersione con il respiratore potrebbe essere ancora più elettrizzante. Ogni specie trovata, se il tempo potesse tornare indietro, sarebbe diversa nei particolari dalla specie attuale. Neppure una specie del Cambriano (e se ne conoscono migliaia) è ancora viva oggi. Tutte le ben note forme moderne, come i mitili, le aragoste, le ostriche, le veneri e i granchi, vi sarebbero completamente assenti. Non vi sarebbe un solo pesce. Per contro, abbonderebbero comunità ondeggianti di vermi, archeociatidi, misteriosi stromatoporoidi, ciuffi di brachiopodi, coralli solitari e spugne oscure. Interi phyla di esseri marini globulari giganteschi e pulsanti potrebbero essersi moltiplicati copiosamente. Costituiti interamente da parti gelatinose molli, non avrebbero lasciato fossili validi. Emergendo dall'acqua, il nostro subacqueo andato a esplorare il Cambriano assisterebbe alle difficili lotte di quella minoranza di animali minacciati, che si prosciugano all'aria sulla spiaggia, ansimando: essi sono gli antenati di quegli animali che si sarebbero adattati alla vita sulla terraferma.

In retrospettiva, questo adattamento può essere visto come un problema ingegneristico di proporzioni scoraggianti, analogo come complessità alla vita di esseri umani su altri pianeti. La vita sulla terraferma attraeva per diversi motivi: c'era molto ossigeno da utilizzare nell'aria e la stessa terra costituiva una frontiera per l'espansione. Ma c'erano anche straordinari ostacoli.

La migrazione nell'ambiente subaereo e la riproduzione senza soste richiedevano agli animali che le realizzavano notevoli cambiamenti in tutti i loro sistemi di organi. Usciti dal mezzo acquatico che ne permetteva il galleggiamento, questi esseri crollavano sotto il loro stesso peso. Per compensare l'assenza di spinta idrostatica, i muscoli dovevano pertanto rafforzarsi e le ossa consolidarsi. Una necessità assoluta era anche quella di possedere un equipaggiamento per la respirazione, in grado di funzionare nell'aria: l'ossigeno, che nell'acqua era presente in sole poche parti per milione, era salito ora come concentrazione a un livello diverse migliaia di volte superiore. Inoltre, per-

ché gli animali potessero affrontare le radiazioni solari non filtrate e molto dannose, che giungevano direttamente a terra, bisognava che si proteggessero con rivestimenti esterni, quali la pelle, cuticole e carapaci. Ma la minaccia maggiore proveniva dalla siccità. Sulla terraferma è in agguato senza sosta il rischio mortale della siccità, della morte per disidratazione. Questa sete inarrestabile andava vinta. Gli organismi che, in qualche modo, non potevano portare con sé una riserva idrica emergendo dall'acqua erano condannati.

La migrazione sulla terraferma fu probabilmente causata da sollevamenti geologici, dal periodico retrocedere delle acque in cui gli animali vivevano. In realtà, solo pochissimi rappresentanti del regno animale riuscirono ad adattarsi con successo alla terraferma. Non esiste un solo phylum animale in cui tutti i membri siano terrestri. I gruppi che oggi possono completare il loro ciclo vitale esclusivamente sulla terraferma si possono fare risalire a tre o quattro: sono animali acquatici ancestrali fuoriusciti dall'acqua, tra cui alcuni artropodi, in particolare gli insetti e i ragni, pochissimi molluschi, come la chiocciola, alcuni anellidi e alcuni membri del nostro stesso phylum, i cordati. I cordati hanno un sistema nervoso tubulare in posizione dorsale e, in qualche stadio del ciclo vitale, sviluppano sempre fessure branchiali, prova della loro ascendenza marina. Il subphylum di cordati a cui noi, specie umana, apparteniamo sono i vertebrati. Dell'altra trentina circa di gruppi di invertebrati, non un solo membro di una qualsiasi specie è mai sopravvissuto nel corso del suo normale ciclo vitale confinato sulla terraferma.

Naturalmente, molti animali acquatici hanno compiuto il tragitto dall'acqua alla terraferma "a cavalluccio" di qualche altro organismo. Per esempio, vivendo nelle cavità nasali umide e nell'intestino dei vertebrati, i pentastomidi (linguatulidi) e le tenie hanno colonizzato solo superficialmente quel terzo del globo terrestre che è realmente "terra" in contrapposizione al mare. Perfino nelle sei classi di cordati (pesci ossei e cartilaginei, anfibi, rettili, uccelli e mammiferi), solo le tre classi evolutesi più di recente (rettili, uccelli e mammiferi) hanno completamente annullato la necessità di ritornare nell'acqua in qualche periodo della loro esistenza.

E tra le specie oggi viventi, i cui antenati vivevano in mare e possedevano parti dure, ci sono anche quelle che sono ritornate all'ambiente marino. Gli ittiosauri, rettili nuotatori del Mesozoico, si evolvettero sulla terraferma e solo in seguito, sotto l'effetto di un insieme diverso di pressioni selettive, ritornarono in mare. Così, anche le foche e i leoni marini, che ammiriamo negli acquari, non sono, in realtà, nulla più che animali di terraferma a perfetto agio nell'acqua. Tutt'altra cosa dai pesci dal punto di vista evolutivo, gli antenati delle foche, dei leoni marini, dei delfini e delle balene si evolvettero tutti come tetrapodi terrestri. Noi, organismi terrestri, deriviamo tutti in ultima analisi da antenati acquatici. Per ogni animale vivente la fecondazione tradisce una comune ascendenza acquatica. L'atto essenziale della creazione animale si svolge ancora nell'acqua. Uovo e spermatozoo si incontrano sempre in un ambiente acquatico, sia esso il mare, un fiume, uno stagno o i liquidi corporei di un organismo.

In un certo senso, quelle specie animali che si adattarono perfettamente alla terraferma vi riuscirono ricorrendo all'espediente di prendere con sé parte del loro precedente ambiente. Nessun animale ha mai realmente abbandonato del tutto il microcosmo acquatico. La blastula e l'embrione si sviluppano ancora nelle condizioni primitive di umidità e di galleggiabilità che offre l'utero. Gusci e rivestimenti impermeabili incapsulano l'ambiente primordiale. A tutti gli effetti, le concentrazioni di sali nell'acqua marina e nel sangue sono identiche. È interessante come le proporzioni in cui si trovano il sodio, il potassio e il cloro nei nostri tessuti siano simili a quelle riscontrabili nei mari di tutto il mondo. I sali degli elementi or ora citati sono composti che gli animali prendono con loro quando affrontano il pericoloso viaggio verso la terraferma. Indipendentemente da quanto elevata e arida sia la cima della montagna e appartato e moderno sia il nostro rifugio, il nostro sudore e le nostre lacrime sono fondamentalmente acqua di mare.

Decisivo per il trasferimento degli animali sulla terraferma fu ciò che essi fecero con l'elemento calcio. Il calcio è una materia prima indispensabile per edificare le più splendide strut-

ture biologiche e geologiche, come il cervello umano e le Bianche Scogliere di Dover. La sua quantità in soluzione nel citoplasma di una cellula nucleata deve sempre essere mantenuta attorno a una parte per dieci milioni. Ma, nell'acqua di mare, questa concentrazione può essere diecimila volte maggiore o anche più. Il calcio tende a penetrare in abbondanza nelle cellule e queste, pertanto, devono continuamente sbarazzarsene. Come fanno oggi tutte le cellule con nucleo, le prime cellule animali dovevano continuamente estromettere il calcio per poter essere in buona salute. Oggi carbonato di calcio viene prodotto da cellule particolari all'interno di sacche membranose, poi in una forma precristallina è trasferito all'esterno attraverso canali (lungo i quali decorrono gli onnipresenti microtubuli).

Il calcio ha una funzione fondamentale nel metabolismo di tutte le cellule nucleate. È indispensabile nel movimento ameboidale, nella secrezione cellulare, nella formazione di microtubuli e nell'adesione cellulare. Quando è disciolto deve essere continuamente rimosso dalla soluzione circostante ai microtubuli perché questi possano funzionare regolarmente nella mitosi, nella meiosi e nell'attività cerebrale. Poiché la parte "chemo" dei messaggi chemoelettrici inviati dai neuroni presenti nel cervello ha molto a che fare con il calcio, le reti di comunicazione del cervello, basate sull'eccitamento dei neuroni, dipendono da questo elemento tanto quanto le reti di comunicazione telefonica dipendono dai cavi in rame. Il cervello dei primi minuscoli animali aveva cominciato ad evolversi fin da 620 milioni di anni or sono.

Per questi primi animali forse più importante ancora era l'impiego del calcio nell'attività muscolare. I muscoli si contraggono quando, attorno a loro, vengono liberate quantità ben precise di calcio e ATP in soluzione. Il calcio deve essere scrupolosamente mantenuto in quantità di gran lunga inferiori a quelle dell'acqua di mare, altrimenti la chimica prende il sopravvento e il fosfato di calcio precipita dalla soluzione in forma solida. (Questo è il motivo per il quale gli atleti che sottopongono a eccessivo sforzo i loro muscoli tendono a formare in essi depositi di calcio.) Il tessuto muscolare, e l'actomiosina

che lo costituisce, tende a essere lo stesso in tutti gli animali. L'origine dell'actina è un mistero dell'evoluzione: nell'ipotetico antenato delle nostre cellule, il *Thermoplasma*, è stata ritrovata una proteina actinosimile. Se questo dato verrà confermato avremo un esempio in più di come la prima comparsa di un'invenzione sia avvenuta nel microcosmo batterico.

I vermi acquatici dal corpo molle e le forme a goccia non ben definite dell'epoca di Ediacara nuotavano servendosi di muscoli. Per farlo controllavano il metabolismo del calcio. Poiché la contrazione muscolare è una risposta alla liberazione di questo elemento, è estremamente probabile che la muscolatura delle prime creature marine del Cambriano, anche dei primissimi anellidi, con tutte le loro contorsioni, fosse sotto il controllo del calcio. Alcuni di questi animali devono aver secreto pezzi di corazza calcarei e pellicole protettive, simili agli elmetti e ai pettorali degli antichi greci e romani; non si trattava però ancora di scheletri completi.

È piuttosto interessante il fatto che, di specie legate per il resto da una grandissima affinità, l'una calcifichi e l'altra no. Per esempio, l'unica differenza tra certe specie molto affini di alghe rosse del genere *Corallina* è che l'una è ricoperta da placche rigide di carbonato di calcio, mentre l'altra è molle. Stephen Weiner dell'Istituto di Ricerche Weizmann in Israele ritiene che la specie che calcifica produca una sufficiente quantità di proteine con una spaziatura regolare, tanto da formare un'impalcatura entro cui si inseriscono i cristalli di carbonato di calcio. L'altra specie, invece, produce troppo poca proteina o una sua forma alterata con una spaziatura non consona. D'altra parte, poiché in alcuni casi specie distinte di organismi, separatesi milioni di anni or sono, producono entrambi carbonato di calcio, è probabile che la capacità di far precipitare in maniera regolare i composti del calcio si sia evoluta con successo molte volte, in molte differenti specie per molti scopi distinti.

Sempre utilizzato dalle cellule nucleate, l'eccesso di calcio deve essere escreto o accumulato fuori dalla soluzione in modo che non provochi danni. Fin dal Cambriano gli organismi hanno formato riserve o di fosfato di calcio, depositatosi sotto

forma di denti e di ossa, o di carbonato di calcio, che compare sotto forma di gusci e di conchiglie.

Gli scheletri non compaiono affatto nel Cambriano: li precedono i muscoli di Ediacara. La necessità di far fronte continuamente alle eccedenze di calcio formatesi nella cellula favorì, in alcuni animali, all'interno o all'esterno del loro organismo, l'accumulo di sali di calcio in ammassi di materiale di scarto che, alla fine, venne utilizzato per formare scheletri e corazze. Proprio come i nidi delle termiti sono in gran parte costruiti con gli escrementi e la saliva di quegli insetti, così scheletri e denti sono fatti di composti che, in origine, erano stati escreti come scorie.

La maggior parte dei gusci e dei rivestimenti esterni oggi è fatta di carbonato di calcio. Minuscoli protisti marini, come i foraminiferi e i coccolitoforidi, hanno eliminato nell'acqua così tanto calcio per periodi di tempo tanto lunghi da produrre, in Inghilterra, le famose Bianche Scogliere di Dover, un deposito imponente di calcare. (Come il carbone o il petrolio, queste scorte di carbonio organico non vanno perdute, ma rimangono nella grande riserva costituita dalla biosfera fino a quando la vita scopre nuovi modi di riciclarle.)

I nuovi organi che sostituirono i vecchi, così ricchi d'acqua, dovevano per forza avere successo. Le branchie, abili nel raccogliere ossigeno dall'acqua, erano inutili nell'aria. Nel corso dei millenni, divennero vestigia, assieme alle fessure branchiali che appaiono come minuscole cicatrici sotto le orecchie dei feti umani. In alcuni cordati, come gli anfibi, i rettili e i mammiferi, si formarono polmoni per rifornire il sistema circolatorio di aria. Un analogo sistema di tubi aeriferi, le trachee, si svilupparono negli artropodi adatti a vivere sulla terraferma, come i ragni e gli insetti.

Quando dovevano affrontare pericoli ambientali spaventosi, gli organismi evitavano di dover subire cambiamenti radicali, incorporando il nuovo nel vecchio già sperimentato. L'insieme di ossa, evolutosi nei pesci, animali che nuotano, fu utilizzato in seguito per dare sostegno meccanico agli anfibi sulla terraferma e sostegno aerodinamico agli uccelli nell'aria. Il materiale di base per la costruzione divenne il calcio eliminato e ac-

cumulato vicino ai muscoli. I primi vertebrati si evolvettero in pesci, esseri a simmetria bilaterale, veri artisti nella fuga e velocisti, in grado di guizzare via come saette dai predatori e di inseguire con grande rapidità la preda.

La competizione tra feroci predatori, assieme al rischio di disidratazione nelle raccolte d'acqua che andavano via via prosciugandosi, costrinse i primi animali a trasferirsi sulla terraferma. Ma la terra infuocata non era una bella alternativa all'aria di guerra che dominava nei mari. La terraferma era, per certi aspetti, un paradiso terrestre, una riserva naturale, libera, in origine, da pericolosi predatori. Ma era anche un inferno: un ambiente dove il sole è una tortura, il vento morde e dove viene a mancare, sotto forma di pressione idrostatica, il sostegno dell'acqua. Le strutture calcificate, come i gusci delle conchiglie, ebbero origine dai cumuli di calcio in eccesso, ma si eressero a mano a mano come una combinazione di strutture di sostegno gravitazionale, di scudi contro le radiazioni solari e i predatori e di "acquari" organici, per proteggere gli animali contro la disidratazione.

In tutto ciò che è stato scritto sull'evoluzione e l'espansione sulla terraferma di piante e di animali, è facile dimenticare il ruolo dei funghi. Questi rappresentano un terzo fondamentale piano di organizzazione per le cellule nucleate in fase di evoluzione. I funghi si sviluppano da spore e formano prolungamenti tubulari sottili, le ife, spesso suddivise da setti, le pareti trasversali. La loro organizzazione alternativa include, tra l'altro, il fatto che le cellule fungine possano contenere molti nuclei e che il citoplasma possa fluire più o meno liberamente da cellula a cellula attraverso i setti. Diversamente dagli animali, che sono muniti di stomaco, i funghi digeriscono il cibo all'esterno del corpo. Si accrescono assorbendo le sostanze nutritive, piuttosto che procurandosele o attraverso il processo fotosintetico o attraverso l'ingestione di alimenti. Esempi comuni di funghi sono le muffe, i lieviti, i tartufi, le morchelle e molti basidiomiceti (funghi mangerecci). Delle 100000 specie stimate di funghi, la maggior parte è terrestre.

Pur costituendo un regno separato, i funghi hanno stretti rapporti con le piante. Probabilmente si evolvettero da una li-

nea di protisti che avevano già una somiglianza con i funghi attuali e che assorbivano il cibo direttamente dal corpo vivo o morto di alghe, di piante e di animali. E sembra che si siano coevoluti con le piante nel passaggio sulla terraferma. Fossili fungini, trovati specialmente all'interno di tessuto vegetale fossile, sono noti da oltre 300 milioni di anni. Uniti in simbiosi con le radici delle piante, trasferiscono due elementi nutritivi, il fosforo e l'azoto, su scala mondiale. Senza funghi, le piante andrebbero incontro a una forma di carenza riguardo ai due elementi. Per tale motivo, è stato suggerito che, senza funghi, le primitive foreste non sarebbero potute esistere. Dotati di notevole elasticità, alcuni funghi sono in grado di crescere in ambienti acidi, mentre altri possono svilupparsi in ambienti estremamente poveri di azoto. Le loro pareti cellulari chitinose, resistenti, rigide e in grado di sopportare l'essiccamento, li hanno resi ben adatti a vivere sulla terra.

Tutti i funghi formano spore. Se incombe la minaccia dell'essiccamento e non sono disponibili partner sessuali, si formeranno immediatamente spore asessuali senza dover ricorrere al sesso. D'altro canto, vi sono numerosi funghi che dipendono profondamente dal sesso meiotico. Alcuni possono avere fino a 78000 tipi di accoppiamento o "sessi" diversi in un'unica specie, come fa *Schizophylum commune*, un fungo comune lungo i bordi delle strade.

I funghi sono, in realtà, un regno sottovalutato, in passato riunito senza necessità in un unico mucchio con i batteri e altri non animali nel regno delle piante. Ma organismi come i funghi velenosi e i lieviti mostrano caratteristiche così peculiari che i biologi sono concordi oggi nel dire che essi meritano una posizione tassonomica distinta, il regno dei funghi.

I funghi compaiono anche nella cultura umana. Nella Francia meridionale e in Italia, i maiali sono addestrati a trovare con il fiuto i tartufi, considerati una prelibatezza. I tartufi sono così intimamente legati a certi alberi che non si riesce a coltivarli isolatamente. Ci curiamo con la penicillina, una difesa chimica contro i batteri, inizialmente prodotta, molto tempo fa, dalla muffa verde del pane e della frutta (*Penicillium*). La penicillina impedisce ai batteri infettivi di produrre le pareti

cellulari: così il fungo, salvando se stesso, salva anche milioni di vite umane.

Ma i funghi, come i batteri, non sono sempre così benefici. *Claviceps purpurea*, agente causale della segale cornuta, può infettare interi campi di segale, provocando aborti spontanei nei bovini che mangiano le cariossidi infette e una malattia inguaribile, il fuoco di Sant'Antonio. Nel Medio Evo, la gente che mangiava pane confezionato con segale infetta rimaneva intossicata. Gli sclerozi della segale cornuta contengono, inoltre, acido lisergico, la sostanza da cui il chimico svizzero Albert Hofmann ottenne per la prima volta la rispettiva dietilammide o LSD. Hofmann scoprì incidentalmente l'LSD, il più potente allucinogeno conosciuto, mentre compiva esperimenti con l'acido lisergico, un farmaco utilizzato in piccole quantità per provocare il parto, per arrestare l'emorragia dopo il parto, e per venire in soccorso di pazienti colpiti da attacco coronarico.

Le tendenze, specifiche di funghi e affini, a interferire con i processi metabolici animali e batterici più disparati fanno pensare ad antichi meccanismi di difesa evolutivi. I cambiamenti psicofarmacologici indotti da allucinogeni del tipo di quelli che sono presenti in *Amanita* o in *Psilocybes* rappresentano le modalità di sopravvivenza coevolutive dei nostri predecessori animali. Si immagini l'intensa pressione selettiva sui nostri antenati mammiferi affamati. Rapidamente, questa pressione potrebbe aver indotto la comparsa di individui in grado di rielaborare metabolicamente cibi tossici. Alcuni di questi cibi erano funghi, o piante, o combinazioni dei due, presenti in grande abbondanza nell'ambiente. A loro volta, piante e funghi erano soggetti a pressione per sviluppare di nuovo alcaloidi deterrenti, come il principio della segale cornuta. Gli animali che dovevano trasformare gli alimenti pericolosi, contenenti alcaloidi, sopravvivevano appena all'esperienza metabolica. Gli agenti che alterano la mente e il corpo possono far ricordare un tipo di lotta metabolica: la coevoluzione imperfetta di specie divoratrici e di specie divorate.

Tutto ciò rientra chiaramente nel campo delle ipotesi, mentre è evidente che tutte le specie che si sono evolute si sono, in

realtà, coevolute. Questo discorso vale, naturalmente, per il macrocosmo non meno che per il microcosmo. La produzione di alcaloidi da parte delle piante e dei funghi per regolare le loro reciproche velocità di accrescimento, oppure per tenere lontani i predatori animali, può essere considerata una specie di corsa alle armi chimiche, ma essa ricorda anche le simbiosi del microcosmo. I funghi sono le principali cause di malattie nelle piante, ma hanno anche un'importanza decisiva per la sopravvivenza delle piante. Relazioni dannose tra predatore e preda possono spesso essere considerate come facenti parte di simbiosi più vaste, in cui perfino pestilenze letali favoriscono le popolazioni colpite, in modo da evitare che esse raggiungano un numero tale da esaurire le scorte di cibo.

In realtà, nel Fanerozoico, la nostra era moderna (da 570 milioni di anni or sono a oggi), non c'è molto di nuovo. Tranne per innovazioni esoteriche come il veleno dei serpenti, gli allucinogeni delle piante e dei funghi e le cortecce cerebrali, già alla fine del Proterozoico (2500-580 milioni di anni or sono), aveva avuto luogo l'evoluzione di quasi ogni principale tecnica di sopravvivenza a cui la vita ricorre oggi. Batteri color verde erba, resti di spirochete e mitocondri erano già da tempo sulla scena. Su una Terra in continuo mutamento, essi conservavano le antiche conquiste della vita primitiva, evolvendosi in nuove forme pur mantenendo la capacità delicatissima di produrre cibo utilizzando l'energia solare, gestendo l'informazione genetica ed eliminando per combustione l'ossigeno dannoso. Alcune delle ricombinazioni microbiche diedero origine ad animali delle coste marine in grado di controllare il proprio tenore di calcio. Ma le forme effettive assunte dagli animali sono pressoché fortuite per i microbi. Il punto importante è che, conservando i loro ambienti primordiali in strutture stabili, resistenti all'acqua, come gli scheletri esterni, i microbi poterono espandersi. E si espansero. Nel fare ciò, lasciarono resti animali che, per molto tempo, furono considerati fossili delle prime forme di vita sulla Terra. Oggi le nostre conoscenze sono migliorate.

La vita sulla Terra ha una storia così interessante che non ci si può permettere di perdere l'inizio. Gli storici cominciano

forse lo studio della civiltà con la fondazione di Los Angeles? Così sarebbe lo studio della storia naturale se si ignorasse il microcosmo. Piante, funghi e animali emersero dal microcosmo. Al disotto delle nostre differenze superficiali, siamo tutti comunità di batteri in cammino. Il mondo luccica, paesaggio divisionistico costituito da tanti minuscoli esseri viventi. Le sequoie giganti e le balene, le zanzare e i funghi sono tutte intricate reti simbiotiche, manifestazioni modulari della cellula nucleata. Con queste deleghe, i microbi hanno trovato la via per trasferirsi sulla terraferma.

Capitolo 12

L'uomo egocentrico

L'uomo è un egocentrico consumato. Prima che Copernico fondasse l'astronomia moderna, i nostri antenati ritenevano che la Terra, dove essi abitavano, fosse al centro di tutto l'universo. Ancora oggi, benché C. Darwin abbia dimostrato che siamo solo un ramo recente dell'albero evolutivo, la maggior parte della gente ritiene che gli esseri umani siano biologicamente superiori a tutti gli altri viventi. Mark Twain, nel saggio *The Damned Human Race*, un tempo censurato, così si esprimeva: «Da questo momento in poi, per quasi altri trenta milioni di anni, la preparazione procedette rapidamente. Dallo pterodattilo si sviluppò l'uccello, dall'uccello il canguro, dal canguro gli altri marsupiali; da questi il mastodonte, il megaterio, il bradipo gigante, il megalocero e tutta quella massa di esseri dei quali sono rimasti fossili utili e istruttivi. Venne quindi la prima grande glaciazione, di fronte alla quale tutti batterono in ritirata e, attraversando l'istmo di Bering, cominciarono a vagare per l'Europa e per l'Asia, estinguendosi alla fine. Non tutti però. Alcuni sopravvissero per preparare il nuovo avvento. Sei glaciazioni, con due milioni di anni intercalati fra l'una e l'altra, non diedero requie a questi poveri orfani in su e in giù per la Terra, un poco dovunque, da un clima all'altro, dal caldo soffocante dei Tropici, ai poli, al gelo artico, all'equatore, e poi di nuovo in su e in giù, senza mai sapere a che tipo di clima sarebbero andati incontro. Se poi quegli animali fossero andati a insediarsi da qualche parte, l'intero

continente sarebbe potuto sprofondare all'improvviso sotto di loro senza il minimo segno premonitore. Avrebbero dovuto, allora, barattare con i pesci le località dove abitare e inerpicarsi, ridotti quasi come stracci, fino a dove un tempo c'era il mare. E, quando non ci fosse stato altro, un vulcano avrebbe cominciato a eruttare e a investirli di fuoco, cacciandoli da dovunque si fossero trovati. Condussero questa vita nomade ed esasperante per 25 milioni di anni, per metà alla deriva, per metà sulla terraferma, e sempre chiedendosi a quale scopo, non sospettando mai, naturalmente, che si trattava di preparare il terreno per l'uomo e che si doveva procedere proprio così altrimenti egli, quando fosse arrivato, non avrebbe trovato alcun luogo adatto e armonioso per lui.

Alla fine venne la scimmia, e chiunque avrebbe potuto vedere a questo punto che l'uomo, ormai, non era più lontano. Ed era davvero così. La scimmia continuò a svilupparsi per circa cinque milioni di anni; quindi si trasformò, sotto tutti gli aspetti, in un uomo.

Questa è la storia. L'uomo esiste da 32000 anni; furono però necessari 100 milioni di anni per preparargli il mondo e questa è la prova che il mondo è stato fatto apposta per lui. Perlomeno io lo suppongo. Se la Torre Eiffel dovesse oggi rappresentare l'età del mondo, il velo di vernice che ricopre il pomolo del pinnacolo alla sommità rappresenterebbe la parte occupata dall'uomo in tutto quell'arco di tempo e chiunque si accorgerebbe che quel velo di vernice è ciò per cui l'intera torre è stata costruita. Suppongo che se ne renderebbe conto, ma non lo so per certo.»[33]

Come suggeriscono le parole piene di sarcasmo di Mark Twain, *Homo sapiens* non rappresenta affatto il pinnacolo del progresso. Coloro che si fanno portavoce degli interessi particolari degli esseri umani non vedono come, in realtà, la vita sulla Terra possa essere interdipendente. Il fatto è che non si riesce ad avere una visione equilibrata della storia evolutiva se la si guarda soltanto come fase preparatoria della comparsa degli esseri umani. L'80% della storia della vita è occupata dai microbi e noi siamo il frutto di varie ricombinazioni di processi metabolici che si svolgono nei batteri aerobi e in altre forme

di batteri, comparsi circa due miliardi di anni or sono quando cominciò ad accumularsi l'ossigeno atmosferico. Mentre leggiamo queste righe, vestigia di batteri, con un DNA che gli studiosi di biologia molecolare identificano come molto simile al DNA dei batteri a vita indipendente, si dividono come mitocondri all'interno delle nostre cellule nucleate.

Gli esseri umani non sono eccezionali, o a sé, o unici. Un'estensione biologica della visione copernicana secondo cui l'uomo non è al centro dell'universo ci priva anche di quella posizione che avevamo come forma dominante di vita sul pianeta. Potrebbe essere un colpo per il nostro Io collettivo, ma sta di fatto che noi non siamo i dominatori della vita, situati sul gradino più alto della scala evolutiva. La nostra saggezza è una permuta fatta con la saggezza della biosfera. Non abbiamo affatto inventato l'ingegneria genetica, ma ci siamo insinuati nei cicli vitali dei batteri, i quali da tempo si scambiano direttamente i geni e li copiano in proprio. Non abbiamo "inventato" l'agricoltura o la locomozione a cavallo, ma siamo rimasti coinvolti nei cicli vitali delle piante e degli animali, il cui numero è aumentato in parallelo al nostro.

Allo stesso modo, le tanto vantate realizzazioni tecnologiche, dalla scrittura oltre 10000 anni or sono nell'Asia sudorientale, all'attuale microchip, non sono di *nostra* proprietà. Vengono dalla biosfera, dall'ambiente così ricco di interconnessioni, che appartiene a *tutta* la vita e alla fine, anche se dovessero evolversi di nuovo, non appartengono a noi, ma alla biosfera. Secondo la nostra teoria sulla natura dell'intelletto, che considera quest'ultimo costituito da residui di spirochete, l'alta tecnologia non è realmente nostra, ma ha una natura planetaria. Abbiamo continuato a separarci dal resto della vita, incubando forme di organizzazione che, alla fine, sono risultate più grandi e più ricche di noi. Ci siamo separati dagli altri organismi e li abbiamo sfruttati, ma sembra improbabile che una simile situazione possa perdurare. La realtà e il ripetersi della simbiosi nel corso dell'evoluzione suggeriscono l'idea che noi ci troviamo ancora in uno stadio di espansione, «parassitario», e che, se vogliamo raggiungere una longevità evolutiva, dobbiamo rallentare, dobbiamo an-

che spartire con gli altri esseri viventi, dobbiamo riunirci con loro.

La storia dell'ascesa e della rapida espansione degli esseri umani sulla faccia della Terra può ben difficilmente essere considerata come il racconto di una conquista. Come rampolli ricchi e viziati, abbiamo ereditato le ricchezze genetiche direttamente dagli animali sopravvissuti alle più grandi estinzioni in massa che si siano verificate sulla Terra, tra cui la famosa estinzione del Cretaceo, che ebbe luogo 66 milioni di anni or sono e che distrusse non solo i dinosauri, ma anche molte famiglie di mammiferi e plancton marino, e le ancora più devastanti estinzioni del Permo-Trias, 245 milioni di anni or sono, che uccisero un buon 52% di tutte le famiglie viventi sulla Terra a quell'epoca (in confronto all'11% del Cretaceo). Varie teorie sono state proposte per spiegare queste estinzioni. Secondo una di esse, all'epoca delle estinzioni del Permo-Trias, l'unico continente mondiale, la Pangea, si sarebbe fratturato in due continenti. Secondo un'altra, sulla Terra, all'epoca della catastrofe del Cretaceo, si sarebbe verificato l'impatto con una grossa meteorite.

Negli ultimi 500 milioni di anni, ci sono state ben quattro estinzioni in massa, ancora più devastanti di quella che portò alla definitiva scomparsa dei dinosauri. Si è sostenuto che, statisticamente, esse hanno avuto luogo all'incirca ogni 26 milioni di anni e questo dato ha suggerito a qualcuno, in particolare all'astronomo Richard Muller dell'Università della California a Berkeley, l'esistenza di "Nemesi", un'ipotetica stella compagna del Sole. Nemesi, come viene ipotizzato, trae ciclicamente le comete fuori dall'orbita nella nube di Oort e le invia, facendole roteare rapidamente, verso il Sole; alcune di esse finiscono per colpire la Terra, distruggendo le parti vulnerabili della biosfera. (La nube di Oort, così chiamata dal nome dell'astronomo olandese Jan Oort, è una fascia di comete e di detriti cosmici al di là di Plutone. Essa potrebbe essere costituita dal materiale rimasto in seguito alla formazione del sistema solare.) Altri scienziati hanno suggerito che responsabile delle estinzioni potrebbe essere stato il regolare movimento verticale del sistema solare attraverso il piano galattico della nostra ga-

lassia a spirale. Il Sole impiega circa 250 milioni di anni a percorrere un giro completo attorno alla Via Lattea, ma durante il percorso va anche in su e in giù. Attraversando regioni dense del cielo, farebbe periodicamente sfuggire file di comete dalla stessa nube di Oort. Quali che siano i veri motivi, la progenie dei sopravvissuti a quelle periodiche devastazioni ha ereditato la Terra. Come la fenice risorta dalle proprie ceneri, così il DNA si rigenerò in nuove forme durature. Possiamo, certamente, ricostruire la nostra storia, ma dovremmo ricordarci che essa non è né più necessaria né più nobile di quella di qualunque altra specie vivente oggi sulla Terra.

I primi vertebrati, organismi relativamente grandi con scheletro ricco di fosfato di calcio e una scatola cranica a protezione di un sistema nervoso elaborato, potrebbero essersi evoluti circa 510 milioni di anni or sono a partire da larve simili a girini, appartenenti a invertebrati. A giudicare dalla somiglianza dello sviluppo fetale in così tanti animali e da frammenti ossei trovati nei reperti del tardo Cambriano, giovani precoci di alcuni invertebrati avrebbero acquisito – secondo una teoria – la capacità di riprodursi senza trasformarsi preliminarmente in adulti attraverso la metamorfosi. Questi animali ancestrali, i cordati, avevano un organo di sostegno dorsale, la notocorda, ma non ossa. Come per le forme del Cambriano, provviste di conchiglia, la sperimentazione in atto per formare riserve di calcio portò a forme divergenti; comparvero così i primi animali sul tipo dei pesci, dotati di una corazza esterna, ma privi di mascelle. Questi primi pesci agnati, per la maggior parte grandi quanto un righello, si nutrivano aspirando l'acqua e tutto ciò che essa conteneva.

Il periodico abbassamento della linea costiera, per effetto di forze geologiche, lasciava molti pesci ad ansimare sulle rive, fuori dall'acqua. A mano a mano che, nelle pozze di marea, nei laghi e negli stagni, l'acqua evaporava, gli animali primitivi che in essa vivevano si estinsero quasi tutti. Fecero eccezione creature come i dipnoi australiani e africani; si ritiene che essi siano dei sopravvissuti. I dipnoi utilizzano oggi per la respirazione sia l'ossigeno presente in concentrazione elevata nell'acqua sia l'ossigeno contenuto nell'aria. Si pensa che i loro pol-

moni si siano evoluti da sacchi contenenti gas, le vesciche natatorie, funzionanti come organi per il galleggiamento e formati da estroflessioni dell'intestino. Utilizzati oggi in molti pesci moderni per salire e scendere nell'acqua, questi sacchi intestinali modificati si adattarono all'uso dell'ossigeno quando i pesci ancestrali a cui appartenevano furono spiaggiati su rive aride o melmose. Quando, stagionalmente, in Australia e in Africa, laghi e fiumi si prosciugano, si produce nel cervello dei dipnoi una sostanza che abbassa la loro attività come se fossero in ibernazione. Mentre gli altri pesci muoiono nei letti melmosi dei fiumi, i dipnoi generalmente sopravvivono per ritornare a una vita normale nella stagione umida successiva. Tuttavia, nell'evoluzione dei vertebrati essi occupano un posto insignificante: sono confinati, infatti, in parti recondite del globo, in fiumi che si prosciugano di frequente, e non sono diretti predecessori di quei pesci nostri antenati che emersero dall'acqua per cominciare a camminare barcollando sulla terraferma.

I crossotterigi, un'altra linea di discendenza di pesci (dotati di polmoni pur non essendo dipnoi), ebbero origine nel Devoniano, circa 400 milioni di anni or sono. Probabilmente si evolvettero nei primi anfibi. Un loro genere fossile, *Eusthenopteron*, munito di lische da pesce e pinne tozze, era vicino alla linea principale di discendenza di quegli animali che arrancavano lungo le rive. Dotato di mascelle (una caratteristica unica dei pesci, grazie alla quale questi animali avrebbero contribuito al successivo fantastico sviluppo di tutti i vertebrati terrestri) e con una testa da rana, esso sembra un incrocio tra anfibi e pesci

Forme simili a *Eusthenopteron* si trovano nei reperti fossili fino al Trias. Gli antenati degli anfibi, dei rettili, degli uccelli e dei mammiferi avevano tutti polmoni, probabilmente branchie modificate, in grado di affrontare una mancanza d'acqua per brevi periodi. Al tempo delle catastrofi del Permo-Trias, le pozze d'acqua contenenti pesci si erano già prosciugate parecchie volte. Mentre alcuni ritengono che, a quell'epoca, gli antenati delle rane, delle salamandre e dei tritoni fossero già approdati sulla terraferma, altri suggeriscono che le rane e le salamandre moderne siano sufficientemente diverse dai primi

Tabella 2

Classificazione della specie umana

Posizione tassonomica della specie umana rispetto al primo taxon che si è evoluto, più grande, e all'ultimo, più piccolo

Taxa (raggruppamenti)	*Caratteristiche*	*Età**
Regno Animali	Sviluppo da una blastula	750
Phylum Cordati	Sistema nervoso cavo, midollo spinale e cervello contenenti liquido, fessure branchiali	450
Classe Mammiferi	Pelo e ghiandole mammarie modificate da ghiandole sudoripare, allattamento della prole	200
Ordine Primati	Anatomicamente non specializzati; comprendono scimmie, scimmie antropomorfe e galagoni	60
Famiglia Ominidi**	Comprende anche la specie umana	4
Genere *Homo*	Tutti estinti tranne noi; probabilmente deriviamo da *Homo erectus*	0,5
Specie *sapiens*	Comprende artisti, poeti, raccoglitori di cibi vegetali, cacciatori di grossa selvaggina	0,001

* Milioni di anni

** Comprendono gli antropomorfi simili all'uomo, vissuti per circa 15 milioni di anni. La maggior parte dei biologi ritiene che gli antropomorfi viventi e l'uomo siano così simili da poter essere inclusi nella stessa famiglia dei Pongidi/Ominidi

anfibi da far pensare a una loro origine separata dai pesci, circa 240 milioni di anni or sono.

I primi anfibi vissero dal tardo Devoniano alla fine del Trias, cioè da 345 a 195 milioni di anni or sono, con un massimo rigoglio 310 milioni di anni or sono, quando dominarono sulle paludi carbonifere. *Ichthyostega*, ricostruito con resti fossili trovati in Groenlandia, fu uno dei primi veri anfibi. Con zampe carnose, un residuo di coda ricoperto da scaglie di pesce e una testa da anfibio, aveva una struttura scheletrica che ricorda quella dei pesci con respirazione aerobica. Alla fine del Paleozoico (400-245 milioni di anni or sono), nelle foreste paludose carbonifere, tra licopodi arborei e pteridosperme giganti, gli anfibi si irradiarono con numerose specie insolite, di cui poco rimane di ben conosciuto a parte le rane.

Già nel Trias, tuttavia, era in corso l'evoluzione dei rettili. Fin da 245 milioni di anni or sono questi avevano soppiantato gli anfibi dalla terraferma e 195 milioni di anni or sono, alla fine del Trias, anche dall'acqua. I rettili possedevano mascelle robuste, una cute resistente alla disidratazione e, cosa più importante di tutte, un nuovo tipo d'uovo. Essi erano riusciti a racchiudere e a incapsulare l'ambiente acquatico dei loro antenati anfibi. Al posto delle numerose piccole uova gelatinose di questi ultimi, le femmine dei rettili deponevano un minor numero di uova, più grosse e più dure. All'interno di queste uova, le forme rettiliari si sviluppavano al punto da essere totalmente preparate ad affrontare la vita sulla terraferma. Questo uovo, con la sua grande quantità di tuorlo, serviva a preparare i rettili a vivere in un ambiente asciutto. Ricreando le condizioni dell'antico ambiente marino, esso (come, del resto, in seguito l'utero dei mammiferi) serviva a ricordare che un tempo la vita si era svolta nell'acqua. Il guscio esterno impediva la dispersione di acqua, mentre permetteva lo scambio dei gas dell'aria. Oggi esistono ancora molti tipi di sauri, la cui linea di discendenza principale si evolvette 240 milioni di anni or sono. Tra questi tipi vi sono anche i sauri apodi, o serpenti, la cui principale famiglia si evolvette soltanto 30 milioni di anni or sono.

Gli anfibi non si svincolarono però mai totalmente dall'acqua. Anche oggi fecondano nell'acqua le loro uova e si sviluppano attraverso uno stadio di girino nei laghi, corsi d'acqua e stagni. Le prime fasi dello sviluppo embrionale nei rettili si svolgono, invece, nell'ambiente acquatico ricreato all'interno dell'uovo fecondato. L'aver incapsulato così quest'ambiente fu una brillante innovazione evolutiva, paragonabile a quella dei semi delle pteridosperme del Paleozoico. Nei rettili ebbe luogo la modificazione delle pinne tipiche dei pesci loro antenati. Oggi l'anatomia comparata dell'arto dei sauri, dello zoccolo del cavallo e della mano dell'uomo mostra che tutte queste appendici sono pinne modificate, che conservano una struttura ossea interna comune a tutti i tetrapodi muniti di scheletro.

Un altro importante cambiamento, che si accompagnò al

passaggio dalla vita in ambiente liquido alla vita in ambiente subaereo, fu lo sviluppo della cheratina. Questa caratteristica proteina della pelle dei rettili e del pelo dei mammiferi permise ai giovani rettili, quando uscivano dall'uovo, di sopravvivere al clima arido. Essa potrebbe essere una delle poche innovazioni metaboliche che non sono derivate direttamente dai batteri e dalle loro simbiosi.

I primi rettili derivati dagli anfibi, detti rettili capostipiti, hanno il loro prototipo in *Seymouria*. Questo è un genere fossile a metà strada tra gli anfibi e i rettili. Ricostruito con reperti fossili trovati nel Texas occidentale, potrebbe trovarsi sulla linea diretta che ha condotto agli esseri umani.

Questi rettili capostipiti (i primi vertebrati adattati a vivere sulla terraferma) diedero luogo a quei fantastici eventi evolutivi a cui venne dato il nome di "radiazioni adattative". I rettili del Mesozoico (245-66 milioni di anni or sono) si accoppiavano e deponevano le uova su terreno paludoso, coperto da vegetazione. Nel Permiano (290-245 milioni di anni or sono) erano già comparsi, tra i rettili capostipiti, quelli che avrebbero dato origine ai mammiferi. I primi rettili simili a mammiferi, un punto di domanda evolutivo senza alcuna certezza di futuro successo, erano forme di vita così poco appariscenti nella loro epoca quanto lo sono i porcospini nella nostra.

Circa 216 milioni di anni or sono, un'altra linea di discendenza dei rettili si evolvette in alcuni di quei "terribili sauri" che sono i dinosauri. Come i pesci prima di loro e gli uccelli dopo, i dinosauri erano dotati di uno scheletro e deponevano le uova; presumibilmente avevano spermatozoi con coda a frustino, dalla struttura 9+2, e bastoncelli, ugualmente 9+2, negli strati della retina sensibili alla luce. Anche i bastoncelli provenivano dal microcosmo. In alcune specie, le membrane dorsali corrugate potrebbero aver agito da collettori solari passivi in grado di regolare la temperatura corporea. Certe specie svilupparono ampie membrane cutanee e riuscirono a volare; altre nuotavano. In alcune femmine di dinosauro, le uova si schiudevano all'interno del corpo, che le alimentava. Le madri partorivano prole viva attraverso la cloaca. Quella parte dell'anatomia del nostro cervello che compare non soltanto nelle

scimmie antropomorfe, ma anche negli ofidi (serpenti) e nei loricati (coccodrilli), cioè il midollo allungato, o tronco cerebrale, può far parte ancora della nostra grande eredità rettiliare.

All'incirca 200 milioni di anni dopo la radiazione adattativa del Trias, che vide affermarsi le principali specie di rettili (serpenti di mare e piccoli dinosauri corridori, come pure le meglio note tartarughe marine, i serpenti e i sauri), tutti i dinosauri si estinsero. Quest'estinzione nel Cretaceo è sempre stata motivo di discussione. Alcuni hanno supposto che le dimensioni dei dinosauri fossero diventate troppo grandi e che essi fossero troppo stupidi per sopravvivere. Erano bestie per le quali era giunto il momento di estingersi. Testimonianze recenti suggeriscono un'altra spiegazione. Vi sono valide prove che l'improvvisa estinzione dei dinosauri e di molte altre forme di vita 66 milioni di anni or sono sia stata indotta da qualche fattore extraterrestre, uno o più planetoidi provenienti dallo spazio esterno.

L'iridio, raro sulla Terra, si trova spesso nelle meteoriti ed è stranamente abbondante nei sedimenti dell'ultima parte del Cretaceo, particolarmente in quelli che si trovano al limite tra Cretaceo e Terziario, un limite che contrassegna la scomparsa di così tante specie. La presenza, nelle rocce di questo periodo, di uno strato di iridio esteso a tutto il globo è stata intepretata dalla coppia di scienziati Luis e Walter Alvarez, padre e figlio, e dai loro collaboratori in California un indizio dell'impatto sul nostro pianeta di una gigantesca meteorite del diametro di circa 11 chilometri. Secondo questi scienziati, la polvere meteoritica avrebbe provocato un prolungato ed esteso black out. Essa, riflettendo calore e luce verso lo spazio esterno, avrebbe causato un raffreddamento della Terra; inoltre si sarebbe verificato un abbassamento molto marcato dell'attività fotosintetica. Si sarebbero accumulati a poco a poco batteri, protisti e piante morti. Batteri non fotosintetizzanti, protisti, funghi e animali avrebbero sofferto per la mancanza di alimento. La produzione avrebbe stagnato. Le estinzioni si sarebbero susseguite l'una dopo l'altra. Scomparvero anche gli enormi dinosauri.

Questo scenario apocalittico avrebbe un poco i connotati del

melodramma. Il paleobotanico Leo Hickey, direttore del Peabody Museum a Yale, fa rilevare che molte specie di piante terrestri sembrano non essere state per nulla interessate da quanto sarebbe accaduto tra Cretaceo e Terziario. Egli si chiede come una tempesta di polvere e un black out su scala mondiale si sarebbero potuti verificare e avrebbero potuto perdurare se un grande numero di alberi forestali, di cespugli e di erbe continuarono a crescere rigogliosamente per milioni di anni, lasciando fossili sia prima sia dopo il limite tra Cretaceo e Terziario. Oggetti estranei potrebbero però essere precipitati sulla Terra, provocando drastiche alterazioni nei tipi di clima. Impatti di questo genere avrebbero prodotto improvvise alterazioni nella temperatura, nell'intensità luminosa, nel livello del mare e così via, con la conseguente distruzione di molte, ma non di tutte, le comunità di organismi. Se la meteora (o le meteore) fosse stata sufficientemente grande, alcuni elementi contenuti in essa, nocivi per alcune forme di vita, avrebbero potuto penetrare direttamente nell'atmosfera. Alcune piante, in grado di tollerare quegli spettacolari cambiamenti climatici, sarebbero, infine, potute sopravvivere.

A partire da circa 20 milioni di anni or sono, i mammiferi cominciarono a prendere consistenza. Si ritiene che i più antichi tra loro, aggirandosi furtivamente e muovendosi con rapidità alla luce della luna, siano state creature sveglie e attive durante la notte. L'aria fredda della notte inibisce i rettili, incapaci di regolare bene la propria temperatura corporea. I mammiferi, invece, non diventano più pigri in ambienti freddi, ma più attivi. Il movimento muscolare genera calore, che i mammiferi sono in grado di controllare e di utilizzare. Così, fin dalle origini, evolvendosi da creature simili agli anfibi come *Seymouria*, attraverso rettili-mammiferi come *Cynognathus*, i mammiferi risultarono più adatti ad affrontare il freddo rispetto ai rettili da cui presumibilmente derivarono. Pur essendovi probabilmente rettili in grado di regolare la propria temperatura corporea, la capacità di svolgere un'attività continua al freddo fu sempre una caratteristica dei mammiferi. Svegli e in stato di allerta per tutta la notte, questi animali dalla vista acuta e dagli occhi dilatati, facevano a meno del calore del So-

le, a cui avrebbero dovuto soggiacere vivendo durante il giorno, e si muovevano furtivamente in ogni direzione. Allontanandosi sia dal caldo sia dai rettili delle zone equatoriali e tropicali, i mammiferi svilupparono mezzi di isolamento più efficaci per conservare la propria temperatura interna. Alcuni, forse, si ricoprirono di penne; i nostri antenati, certamente, secernettero dalle cellule cutanee filamenti di natura proteinacea: i peli. Un altro impiego della cheratina, questa volta come mezzo di protezione contro l'aria fredda. Questa proteina resistente, evolutasi nei rettili, viene ancora oggi utilizzata dagli animali per produrre strumenti e armi per combattere, come gli artigli degli uccelli e i corni dei rinoceronti.

Quando i mammiferi si evolvettero dai rettili, le loro femmine non deposero più le uova fecondate in fosse nel terreno o direttamente all'aria aperta. Al contrario, nutrivano i loro figli all'interno del loro proprio corpo, nel caldo dell'utero. Dopo la nascita, i piccoli affamati succhiavano il secreto prodotto da ghiandole sudoripare situate sul ventre della madre. Queste ghiandole erano le ghiandole mammarie e il secreto nutritizio era latte, un liquido ricco di calcio.

Dagli inizi, all'incirca 200 milioni di anni or sono, sia i mammiferi sia gli uccelli si distinsero dai rettili loro antenati per la particolare attenzione e cura che rivolgevano alla prole. La maggior parte dei rettili ha una prole numerosa che abbandona dopo la schiusa dell'uovo. Invece, gli uccelli moderni (cioè, in pratica, da 133 milioni di anni or sono in poi) e i mammiferi danno nutrimento e assistenza a una prole meno numerosa e più vulnerabile. Un'attività senza precedenti e le cure parentali hanno permesso di distinguere uccelli e mammiferi fin dall'inizio.

I primati originari, all'inizio del Cenozoico (cioè a partire da 66 milioni di anni or sono), erano animali piccoli, astuti, veloci nel saltare e nel sottrarsi ai predatori. Alcuni di questi mammiferi insettivori potevano appendersi ai rami, servendosi di artigli modificati, che negli esseri umani sarebbero diventati le unghie delle mani e dei piedi. Saltare di ramo in ramo nella foresta, di notte, favoriva una visione già di per sé acuta. Questi primati primitivi erano molto simili alle tupaie e ai lemuri at-

tuali e fanno parte anch'essi del gruppo delle proscimmie, cioè di animali che precedono le scimmie. Le proscimmie sono oggi limitate al Madagascar e all'Asia sudorientale, e vivono in luoghi in cui le scimmie non siano troppo numerose. Fossili di proscimmie sono stati trovati in Asia e in Africa.

Tutti i primati oggi, tranne l'uomo, sono vegetariani o insettivori. Si nutrono di noci, di bacche, di frutti, di graminacee e di insetti. Alcuni hanno diete specializzate, come i lemuri: un tipo condivide la tana con le api, del cui nettare si nutre, mentre un altro ha un'unghia lunga e appuntita in corrispondenza del secondo dito per estrarre dai tronchi d'albero termiti e formiche di cui si nutre. Tra i primati l'uomo è l'unico che mangi carne. La dieta carnivora è una consuetudine che, a giudicare dai denti fossili, abbiamo acquisito tardi nella nostra storia evolutiva.

Rifugiandosi sugli alberi dove potevano sfuggire all'attenzione di animali meno agili, questi primati simili a tupaie, non diversi da alcuni piccoli mammiferi placentali che vivono oggi nel Madagascar, svilupparono una graduale convergenza degli occhi dalle tempie verso il centro della fronte (convergenza orbitale). Questa centratura ottica ebbe un'importanza decisiva per la visione tridimensionale, la quale a sua volta era indispensabile per giudicare le distanze sugli alberi. I primati incapaci di stabilire le distanze in modo coerente avevano la tendenza a precipitare dall'alto dei rami sul suolo forestale. La nostra capacità di giudicare le altezze, la nostra propensione a costruire e a rabberciare, forse persino la nostra tendenza ad abitare in palazzi a più piani, sono debitori a questa convergenza orbitale, a questo spostamento degli occhi dai lati della faccia verso il centro della fronte, nel corso di numerose generazioni.

Un altro segno della "arboricolità", o abilità a muoversi sugli alberi, di alcuni tra i primi membri dell'ordine dei primati fu lo sviluppo di mani e piedi prensili con primo dito opponibile e unghie piatte. La presenza di coda prensile, riscontrabile solo nelle scimmie del Nuovo Mondo, è un successivo adattamento dei primati alla vita sugli alberi.

Oggi, nello sviluppo fetale umano, compare una coda vesti-

giale che è chiaramente inadatta per soddisfare qualsiasi necessità. Occasionalmente è capitato, però, che nascesse un bambino con una piccola coda a ciuffo. Della nascita di bambini muniti di coda venne spesso ritenuto responsabile il Diavolo, ma anche i neonati normali mostrano caratteri che si possono fare risalire alle nostre origini arboricole. Appendici inutili come questa erano una delle cose che più impressionarono Darwin a proposito del metodo utilizzato dalla natura nella sua follia. Gli organi rudimentali, così come vengono chiamati, sono parti che, nella vita attuale, non hanno più alcuna funzione. Hanno ben poco significato se non come ricordo di un precedente tempo evolutivo, in cui erano invece necessari per la sopravvivenza. (Perfino il sesso biparentale, come abbiamo visto, non ha alcun senso se non come strana eredità dai cicli vitali dei nostri antenati protisti.) Ma le vestigia dell'evoluzione non devono necessariamente essere strutture come l'appendice cecale o il coccige; possono anche essere *processi*. Subito dopo la nascita, tutti i bambini tentano di stringere a pugno le dita che si trovano dinnanzi. Questa risposta universale, che consiste nell'attaccarsi a qualcosa, deve essere servita a salvare dalle cadute i primati ancestrali, permettendo loro di aggrapparsi al pelo della madre e ai rami più vicini. Analogamente, la sensazione di cadere che, di tanto in tanto, hanno coloro che stanno per addormentarsi e che sono così indotti a risvegliarsi di colpo, potrebbe essere una risposta psicologica tramandata dall'epoca in cui la vita dei nostri antenati si svolgeva sugli alberi. Dormire sugli alberi presenta alcuni rischi. Sia nei movimenti istintivi dei neonati sia nelle tendenze psicologiche degli adulti vi sono rudimenti e reminiscenze delle proscimmie nostre antenate. Non c'è da meravigliarsi, dunque, che i bambini abbiano terrore dei mostri quando vengono lasciati soli al buio, malgrado l'ovvia sicurezza delle loro camere. Nel passato, queste profonde emozioni avevano un indiscutibile valore di sopravvivenza: i bambini inermi erano particolarmente ambiti dai predatori che vagavano nei boschi.

I primati originari erano, dunque, in prevalenza dei pusillanimi che si arrampicavano sugli alberi. Correvano e si nascondevano, e si attaccavano ai rami nella notte stellata. Tutto

questo correre, e nascondersi, e appendersi ai rami, e svolgere di notte una vita attiva si arricchiva di un altro elemento, che era anch'esso indice di pusillanimità: la tendenza incipiente verso un comportamento sociale cooperante. Emettere di frequente suoni di tonalità alta è un modo per tenere lontani i nemici; come tattica di sopravvivenza, l'emissione di suoni nei primati precedette la vera comunicazione vocale. Oggi, come nel caso dei cani selvatici, i ciarlieri babuini si riuniscono in gruppo nella savana africana per respingere singoli predatori. Come le cellule e gli insetti sociali prima di loro, i nostri antenati si riunivano in gruppi. Così osavano fare ciò che nessun individuo avrebbe osato fare singolarmente.

In vari momenti e luoghi, quando noci e frutti diventavano scarsi, i nostri antenati scendevano a terra. Il poter mantenere il controllo visivo al di sopra delle alte graminacee richiedeva una postura eretta e la capacità di lanciare rapidi sguardi in ogni direzione. È ciò che fanno i babuini oggi, dopodiché tornano a rannicchiarsi. Questo genere di perlustrazione ebbe una notevole ricompensa: quegli animali con la testa in aria poterono finalmente avere gli arti anteriori liberi per estrarre le radici dal terreno, per lanciare pietre e maneggiare stecchi come armi o strumenti per costruire ed esplorare. A mano a mano che le dita delle scimmie si specializzarono nella manipolazione i piedi diventarono più piatti. Oggi molte scimmie e scimmie antropomorfe utilizzano le dita per scardassare, partendo dal suolo, le giovani graminacee, di cui mangiano i teneri apici; oppure si aggirano tenendo in mano stecchi, con i quali danno la caccia agli insetti. Un orangutan in gabbia, al Central Park Zoo di New York, lancia le proprie feci, a quanto si dice, in faccia a quegli spettatori che buttano le noccioline o il popcorn troppo distanti dalla sua portata. Noi battiamo le mani o le stringiamo in senso di apprezzamento. Le mani non avrebbero mai raggiunto il livello attuale di potenzialità se non fossero state svincolate dai superflui impegni che avevano nella locomozione.

Proprio come un eccesso naturale di calcio prodotto e simbionti dai rapidi movimenti offrirono alla selezione naturale la materia prima con cui poter modellare gli scheletri e realizzare

la mitosi, così i primati eretti si ritrovarono con una ridondanza di estremità prensili. Il dotare l'organismo di elementi supplementari riproducibili, svincolati dalle proprie funzioni per eseguirne di nuove, può essere definito una *innovazione ridondante*. Questa avviene dal livello molecolare al livello sociale. Un'innovazione ridondante a livello molecolare si ebbe quando le piante eliminarono degli alcaloidi, che assunsero nuovi ruoli attivi come deterrenti alimentari, e quando gli animali svilupparono ormoni a partire da preesistenti sostanze biochimiche, utilizzate casualmente nella comunicazione cellulare dai sistemi genetici dei loro antenati. Un'innovazione ridondante a livello sociale si verificò, invece, quando le società di termiti e di api si differenziarono in operaie, soldati e regine. La società va incontro a una specializzazione che rispecchia quella delle cellule dei cloni che costituiscono i suoi membri; ma questa specializzazione, che conferisce valore di sopravvivenza, non si sarebbe avuta senza la precedente sovrabbondanza o ridondanza di elementi che si riproducono. L'impiego delle mani in compiti diversi dalla locomozione, che inizialmente era un'attività occasionale e non indispensabile, divenne assolutamente necessaria allorché emersero gli australopitecini.

Una descrizione dell'evoluzione umana, accettata su vasta scala, suggerisce che gli esseri umani siano scimmie antropomorfe con uno sviluppo ritardato. Nota tecnicamente come *neotenia*, da radici greche che significano "protrarre la gioventù", cioè conservare caratteri giovanili nella vita adulta, questa condizione può avere avuto un'importanza cruciale per l'origine dell'umanità. Il tempo necessario per passare dall'infanzia alla fanciullezza, e quindi per raggiungere la pubertà e l'età adulta, è più lungo negli esseri umani rispetto al tempo di maturazione di qualunque tipo di scimmia antropomorfa. I tempi in cui avvengono l'eruzione dei denti dalle gengive e la saldatura delle suture ossee nel cranio dopo la nascita (calcificazioni che hanno dei precursori nel Paleozoico, cioè da 580 a 245 milioni di anni or sono) sono ritardati negli esseri umani rispetto a quanto avviene nello scimpanzé, nell'orangutan e nel gorilla. Pertanto, il neonato umano è una specie di feto extrauterino di scimmia antropomorfa, mentre gli adulti umani sono simili

ad antropomorfi che non siano mai cresciuti. Ma il fatto umiliante per noi di essere delle scimmie ritardate ha le sue compensazioni. È una specie di doppio negativo che si tramuta nel suo opposto. L'essere stupidi nell'essere stupidi, o l'essere lenti nell'essere lenti, può venire trasformato in un vantaggio. Lo sviluppo ritardato ci dà il tempo di imparare a essere svelti e intelligenti.

Dal punto di vista delle scimmie antropomorfe, siamo nati troppo presto, prima di essere pronti. Dopo la nascita, il peso del cervello umano, in media, si triplica nei primi due anni, da 350 a 1000 grammi. Mentre gli scimpanzé e gli oranghi si crogiolano in una beatitudine intrauterina, gli esseri umani possono avere letteralmente una "partenza in testa". Essi sono esposti alle influenze del mondo esteriore e modellati da queste, mentre sono ancora malleabili e vulnerabili. Diversamente dalle antilopi che nascono mentre la madre è in movimento o i piccoli delle tartarughe che non conoscono mai i loro genitori, diversamente da qualunque tipo di animale, i cui figli si sviluppano fino a essere interamente formati e preparati per il mondo esterno, i nostri figli non nascono completamente formati e sono totalmente inermi. Essi sono assolutamente dipendenti e hanno la necessità di trascorrere un lungo periodo di maturazione accanto agli adulti. La lunga e spesso reiterata fase di crescita protetta, nel corpo materno, ha mutato direzione. Perché, con gli esseri umani, l'evoluzione si è mossa in direzione opposta?

Dalle informazioni che possiamo ricavare dai reperti fossili, sappiamo che, negli esseri umani, l'andatura bipede precedette lo sviluppo della testa voluminosa. Ma le scimmie antropomorfe con stazione eretta e testa piccola non erano ancora esseri umani. Qualcuna potrebbe aver dato alla luce figli prematuri. Visto che le teste dei feti erano meno grosse, i parti avvenivano più facilmente e, su questi neonati prematuri, l'arduo ambiente esterno avrebbe potuto imprimere esperienze in età più precoci, dando a essi un tempo più lungo per imparare a modificare il proprio comportamento. Si può presumere, così, che i figli delle scimmie antropomorfe, grazie a queste esperienze, abbiano imparato meglio e in più tenera età gli espedienti messi in atto dagli adulti per sopravvivere. Poiché le na-

scite premature sono in parte dovute a una predisposizione genetica, si può ammettere che le coppie di antropomorfi che conservavano nell'età adulta i caratteri giovanili abbiano dato origine a figli nati più prematuramente e neotenici rispetto ai loro pari.

Da questa variazione nel tempo del parto, influenzata geneticamente, prese origine una pressione selettiva, che ebbe una fondamentale importanza nel favorire nascite più premature: in pratica, sarebbe comparso un maggior numero di linee mutanti di neonati prematuri. I piccoli degli antropomorfi, nati relativamente glabri e sottosviluppati, o sarebbero morti o sarebbero stati protetti, e pertanto addestrati, nel mondo esterno. Alcuni avrebbero raggiunto l'adolescenza, rimanendo pressoché glabri e conservando i caratteri giovanili nell'età adulta. Infine, avrebbero dato alla luce figli con un cervello più grosso: scimmie ritardate, ma più intelligenti di qualsiasi altra scimmia. Questo stesso scenario viene ulteriormente arricchito per aggiunta di un altro elemento: la selezione sessuale. I maschi, in ricordo della dea preistorica della fertilità, rappresentata in statuette ritrovate in Europa, scelgono spose con un bacino più ampio, glutei più voluminosi e, di conseguenza, canali del parto più larghi, che consentirebbero, per ipotesi, la nascita di figli con cervelli ancora più grossi.

La nascita precoce di individui sui quali l'imprinting aveva notevoli possibilità di intervento, pur essendo un vantaggio, presentava anche alcuni inconvenienti. Quelle menti si trovavano in corpi minuscoli e pateticamente indifesi. Eppure, da questa debolezza tipicamente infantile – e questo è strano – derivarono famiglia e civiltà. Le femmine furono costrette ad alterare le loro strategie di selezione sessuale. Volevano un altro tipo di compagno. Le giovani madri si attaccarono a maschi che si sarebbero presi cura di loro, mentre loro avrebbero curato i loro fragili, informi figli. Le femmine, dunque, avrebbero scelto partner con un grosso cervello, mentre costoro avrebbero scelto compagne dall'ampio bacino. Presero l'avvio così veri e propri anelli di retroazione. L'intelligenza cominciò a generare altra intelligenza. Più specificatamente, si ritiene che, lanciando sassi, e tramortendo o uccidendo piccole prede, i

primi esseri umani furono catapultati in una nuova nicchia evolutiva. Le capacità psicomotorie necessarie per dare ai proiettili una certa traiettoria, per uccidere a distanza, dipendevano dall'aumento dimensionale dell'emisfero cerebrale sinistro. Le capacità di comunicare tramite un linguaggio (che sono state associate con il lato sinistro del cervello, il quale controlla la mano destra) possono fortuitamente aver accompagnato un simile aumento delle dimensioni cerebrali. William H. Calvin, neurobiologo all'Università di Washington a Seattle, suggerisce addirittura che il nostro destrismo predominante derivi da un tempo in cui le madri, dovendo cacciare da sole, attaccavano il loro piccolo alla mammella sinistra, così da tranquillizzarlo facendogli sentire il suono confortante del cuore (che aveva purtroppo perduto in seguito alla precoce espulsione dall'utero), e con la mano destra libera lanciavano pietre contro piccoli animali. Pertanto, proprio come i calcolatori furono prodotti all'inizio per stimare le traiettorie degli aeroplani nemici, così sia la tendenza degli esseri umani (sconosciuta negli antropomorfi) a essere destrimani sia le capacità di parlare e di scrivere potrebbero essere dovute all'accrescimento di parti del nostro cervello, utilizzate per eseguire in successione funzioni originariamente rinforzate dal successo ottenuto dalle nostre antenate nel lanciare pietre contro piccole prede.

Infine, nel contesto dello sviluppo ritardato dei post-antropomorfi, le femmine persero l'estro, cioè non andarono più "in calore" in determinati periodi dell'anno: femmine come queste erano considerate più attraenti. Oggi, le femmine di tutte le scimmie e scimmie antropomorfe entrano in calore. I genitali di alcune scimmie, babuini e altri, cambiano di colore in risposta a cambiamenti ormonali, con lo scopo di attrarre i partner sessuali. Nella specie umana, la femmina è diversa: può essere "sexy" in qualsiasi momento e non entra mai in una vera fase di estro. I maschi che dedicavano il loro tempo alla famiglia potrebbero aver abbandonato l'abitudine di impegnarsi casualmente nel sesso quando avvenne un cambiamento nell'organizzazione sociale. Dato che le femmine erano sempre più sessualmente ricettive nell'arco dell'intero anno, essi avrebbero avuto minore necessità di vagare alla ricerca di part-

ner sessuali. Un australopiteco che si prendesse cura della madre dei suoi figli e di questi piccoli indifesi rimaneva impegnato con una femmina o due soltanto, dalla quale poteva esigere un rapporto sessuale praticamente in ogni momento. La famiglia che avevano costituito insieme rimaneva insieme.

Bande nomadi e villaggi potrebbero essere sorti allorché i maschi, le femmine e i loro figli si unirono in comunità che potevano svolgere una funzione protettiva, che incuteva timore, sulle nuove unità familiari. Forse l'idea della "Madre Terra" nelle culture primitive (in realtà culture moderne) viene dal fatto che i neonati venivano esposti al mondo esterno in un periodo in cui sarebbe stato meglio che vivessero piuttosto nel grembo materno. Psicologicamente, la Terra sostituisce la madre e il mondo diventa una sorta di secondo grembo materno.

Un altro esempio dell'importanza della neotenia per le origini dell'umanità è il fatto che quasi tutti i mammiferi, dopo l'infanzia, perdono la capacità di digerire il lattosio, lo zucchero contenuto nel latte. Questo zucchero è dannoso per molti in età adulta. Eppure esistono folti gruppi umani adulti che bevono latte; tra essi i popoli semitici, uralici e indoeuropei. Ciò è possibile grazie a una mutazione che si diffuse tra le popolazioni della Mesopotamia settentrionale circa 8000 anni or sono. L'aumento nel numero di mutanti adulti in grado di tollerare il latte spianò la via a una rivoluzione, nell'allevamento del bestiame, più profonda della rivoluzione provocata dalla destituzione di un despota: la mungitura di vacche, pecore e capre, l'impiego di buoi al traino e di aratri e, successivamente, l'addomesticamento di cavalli. Il fatto di tollerare il latte diede agli adulti una fonte di proteine animali che non li obbligava più a uccidere la preda e portò alla produzione di derivati del latte come formaggio, yogurt, caglio e burro. Un altro vantaggio fu che, contenendo il latte vitamina D, utile nel trasporto del calcio, la dieta basata su questo alimento faceva migliorare eventuali carenze vitaminiche, che avrebbero prodotto altrimenti rachitismo, una malattia delle ossa. Anche la melanina, il pigmento scuro della pelle, serve a prevenire il rachitismo. Gli adulti che bevevano latte avevano in generale pelli chiare. Come scrive Nigel Calder: «Con la rivoluzione dei buoi

e dell'aratro, vennero le divisioni sociali che caratterizzano le culture eurasiatiche: divisioni tra ricchi e poveri, tra signori e servi, tra uomini e donne. La guerra divenne un luogo comune, e i guerrieri si insediarono come sovrani.»[34] Anche se, in realtà, gli esseri umani si erano già evoluti da circa quattro milioni di anni prima dell'avvento di questi "cowboy", vale comunque la pena di ricordare questo avvenimento perché la mutazione che permise ad alcuni esseri umani di digerire il lattosio anche dopo l'infanzia fu anch'essa una forma di neotenia. Un ritardo nel verificarsi degli avvenimenti, influenzato geneticamente, rallentò alcuni aspetti dei processi di sviluppo dei primati e ciò potrebbe aver portato gli esseri umani agli albori della storia tradizionale. Tavolette di argilla elaborate, adornate di molti disegni e segni simbolici, apparvero nelle città della Mesopotamia circa 5500 anni or sono.

Ma dobbiamo stare in guardia quando ci eleviamo dal mondo microbico per esaminare la nostra storia. Qualunque affermazione sommaria sarà una generalizzazione e le generalizzazioni di generalizzazioni hanno uguale probabilità di diventare resoconti migliori o peggiori. Quando, per lo sviluppo umano, abbiamo posto l'accento sul concetto di neotenia o di sviluppo da "antropomorfo ritardato", abbiamo dato in sé un quadro eccessivamente semplificato; esso non dovrebbe essere confuso con più di una dimensione di una storia a parecchie dimensioni. Succede di solito che l'evoluzione dell'umanità sia rappresentata come la trasformazione epica di un singolo eroe dell'evoluzione. L'immagine di un dipnoo che si dibatte nell'acqua, sviluppando arti da anfibio per potersi arrampicare sulla terraferma fino a elevarsi nell'umanità trionfante, fa venire il sospetto che essa si avvicini all'esperienza di vita reale non di popolazioni in fase di evoluzione, ma piuttosto di un singolo essere umano. Siamo *noi* che emergiamo dal canale del parto, tossendo quando siamo investiti dall'aria e, in seguito, imparando a muoverci carponi e a camminare. Così, anche l'uomo primitivo, che abbiamo rappresentato nel nostro culto degli eroi dell'evoluzione, è una creatura che esce con la mazza in mano da una grotta primordiale. Sta eretto e si stira alla piena luce della modernità. Ma questo "uomo del-

le caverne" coperto di pelo, che esce dalla grande caverna buia della preistoria, è sorprendentemente semplicistico. Un mito culturale, rinforzato da vignette e da libri umoristici, è più un curioso amalgama di incerte memorie dell'infanzia e di racconti archeologici, che un vero resoconto delle svariate apparizioni ed estinzioni reali, che le scimmie antropomorfe hanno compiuto nel tempo.

È impossibile immaginare la reale complessità della nostra ascendenza. Naturalmente, per la maggior parte, essa non è stata soltanto pre-antropomorfica: è stata microbica. Ma 30 milioni di generazioni di popolazioni di mammiferi, caratterizzati da notevole variabilità, non si possono condensare in un'immagine pittorica o letteraria senza che vengano gravemente distorti. La tendenza, inoltre, è di collegare i punti, di costruire immagini singole, familiari, antropomorfiche. Gli eroi dell'evoluzione simulati ci sollevano dalla fatica di visualizzare la reale molteplicità delle popolazioni, degli esseri non umani e strani.

Siamo primati e i primati sono animali tropicali: detestiamo il freddo e lo temiamo. Essendo poi i primati così differenziati e abbondanti nella fascia tropicale del Vecchio Mondo ed essendo stati trovati tutti i fossili degli australopitecini in Africa, Europa e Asia, si è tutti concordi nel dire che quell'area fu la culla dei nostri antenati. Gli unici antropomorfi in Antartide, in Australia, nelle Americhe settentrionale e meridionale sono esseri umani oppure scimmie in cattività negli zoo.

Studiosi obiettivi, se per ipotesi fossero balene o delfini, porrebbero gli esseri umani, gli scimpanzé e gli orangutan nel medesimo gruppo tassonomico. Non vi è alcuna base fisiologica per la classificazione degli esseri umani in una loro propria famiglia (gli ominidi, comprendenti, oltre alla specie umana attuale, anche le forme fossili intermedie tra le scimmie antropomorfe e questa specie), distinta da quella dei grandi antropomorfi (i pongidi, comprendenti i gibboni, i siamanghi, i gorilla, gli scimpanzé e gli orangutan). Un anatomico extraterrestre non esiterebbe, infatti, a riunirci con le scimmie antropomorfe nella stessa sottofamiglia o, addirittura, nello stesso genere. Gli esseri umani e gli scimpanzé sono di gran lunga più

simili tra loro di due generi qualsiasi di coleotteri, scelti arbitrariamente. Ciononostante, gli animali che camminano eretti con le mani che penzolano libere lungo i fianchi sono, per definizione, ominidi e non pongidi (la famiglia delle scimmie antropomorfe). Gli unici ominidi ancora in vita oggi siamo noi.

Ma, nella documentazione fossile, sono stati trovati molti frammenti di ominidi marcatamente diversi. Sono stati identificati due tipi distinti che accendono l'immaginazione degli antropologi. I due tipi di animali in quest'area intermedia tra l'uomo e le scimmie antropomorfe sono gli australopitecini e membri del genere *Homo*. Diverse specie del genere *Australopithecus* perdurarono fino a circa mezzo milione di anni or sono e poi si estinsero. Alcune potrebbero essere state sulla linea di discendenza che ha portato a noi; altre probabilmente no.

In mancanza di una qualsiasi testimonianza per spiegare l'estinzione degli australopitecini, alcuni antropologi si sono chiesti se, per caso, non fosse stato proprio per il genere *Homo* che quei cugini più taciturni erano finiti in testa alla prima lista, non scritta, delle specie minacciate. La fine di quei più grossi ominidi vegetariani potrebbe essere stata accelerata da massacri o, nel caso di *Australopithecus robustus*, da una servile eccessiva dipendenza dai primissimi veri uomini. Membri di questa specie potrebbero persino essere stati resi schiavi da membri del nostro genere *Homo*. Il goffo *Australopithecus robustus* potrebbe essersi messo al seguito dei nostri antenati, nutrendosi dei loro rifiuti. Sarebbe addirittura possibile, secondo lo scenario delineato da Benjamin Blumenburg del Leslie College e da Neil Todd della Boston University, che quei grossi, stupidi vegetariani si siano estinti quando i nostri antenati li sostituirono con i primi cani. Evolutisi da lupi, i cani sarebbero stati più utili per la caccia e per la sorveglianza; inoltre, avrebbero avvertito di gran lunga meglio gli odori e, essendo più piccoli, sarebbero stati più facili da saziare e meno costosi di qualunque *A. robustus* al seguito degli accampamenti.

Tre specie preistoriche sono identificate come membri del nostro genere *Homo*. In ordine di comparsa, nel corso dell'evoluzione, esse sono: *H. erectus*, *H. habilis* e la sottospecie più antica di *H. sapiens*. *Homo habilis* è considerata specie ance-

strale degli esseri umani e sembra che abbia cominciato a utilizzare utensili di pietra accuratamente scheggiati. *Homo erectus* potrebbe essere stato il primo a utilizzare il fuoco. *Homo sapiens* è la nostra specie e si suddivide in almeno due sottospecie: *Homo sapiens neanderthalensis*, l'uomo di Neanderthal, e *Homo sapiens sapiens*, che siamo noi. La maggior parte degli antropologi concorda nel dire che tutte le specie, tranne *Homo sapiens sapiens*, sono oggi estinte.

Gli ominidi comparvero sulla scena forse due milioni di anni or sono. Le loro forme estinte sono state ricostruite con meno di un migliaio di resti fossili ben identificati. Esse costituivano la linea dei primati che avrebbe condotto a noi e non ai gibboni, ai gorilla, agli scimpanzé e agli orangutan. Gli ominidi, sia gli *Homo* che avrebbero dato origine all'uomo moderno sia gli australopitecini che o si sarebbero evoluti nel genere *Homo* o si sarebbero estinti, avevano soprattutto due caratteristiche: erano tropicali ed erano africani.

Non solo gli altri primati fossili, ma anche membri fossili del genere *Homo* con i rispettivi utensili sono stati trovati quasi esclusivamente in giacimenti delle regioni tropicali e semitropicali del Vecchio Mondo. Le prime pietre lavorate da mani umane o semiumane sono state dissotterrate in Africa. E, in effetti, gli esseri umani sono più simili come struttura, chimica delle proteine, espressioni facciali e comportamento sociale alle scimmie antropomorfe dell'Africa tropicale che non a qualunque altra specie vivente animale. Conserviamo, inoltre, degli adattamenti alla vita in climi molto caldi: possiamo dissipare quantità elevate di calore, dalle 400 alle 500 chilocalorie all'ora, soprattutto mediante l'evaporazione di sudore.

Diversamente dalle scimmie antropomorfe africane, però, noi sudiamo su tutto il corpo: circa due litri all'ora possono evaporare da circa due milioni di piccole ghiandole sudoripare. Anche il sangue funge da liquido refrigerante: una buona parte di esso scorre sotto la superficie cutanea e, quando si lavora in climi molto caldi, il suo volume aumenta per ritenzione di sali e di acqua. Minuscoli vasi lo trasportano sotto la superficie cutanea e fungono così da condotte per il calore, contribuendo a raffreddare tale superficie. Poiché questi adatta-

menti, che permettono di svolgere un'attività in climi caldi, sono comuni a tutti gli esseri umani, è logico sostenere che essi fossero condivisi anche dai nostri immediati predecessori dopo che si erano staccati da una linea di discendenza comune a noi e agli altri antropomorfi viventi.

Benché il narratore della storia dei cacciatori-raccoglitori sia apparso relativamente di recente sulla scena dell'evoluzione (meno di centomila anni or sono), la nostra specie in transizione mostra in realtà una continuità con gli australopitecini africani. Noi siamo probabilmente discesi da madri come "Lucy". Così chiamata dai suoi scopritori, in ricordo della canzone dei Beatles "Lucy in the Sky with Diamonds", che stavano suonando in prossimità degli scavi proprio al momento del ritrovamento, Lucy era un australopitecino nordafricano, i cui resti fossili risalgono a oltre tre milioni di anni or sono. Il suo scheletro fossilizzato, sorprendentemente completo, fu trovato nel triangolo di Afar, vicino ad Hadar, in Etiopia. Era un animale dall'andatura eretta sia quando camminava sia quando correva ed era alta poco più di un metro. Pur avendo il bacino di una donna piccola, il suo volto era quello di uno scimpanzé.

Nella stessa area sono stati trovati in seguito scheletri parziali e denti di diverse decine di individui. Lucy, secondo uno dei suoi scopritori, Donald Johanson, è il prototipo dell'ominide ancestrale *Australopithecus afarensis*. In verità, australopitecini come Lucy e i suoi affini, cioè noi, potrebbero aver avuto antenati comuni simili a scimpanzé, vissuti soltanto quattro milioni circa di anni or sono.

La nuova scienza dell'evoluzione molecolare ci viene in soccorso per valutare la successione temporale degli avvenimenti evolutivi. I dati sulle macromolecole ci permettono di stimare i cambiamenti verificatisi nella divergenza di due linee di discendenza. Per esempio, le analisi sugli amminoacidi di proteine comuni, come le emoglobine dello scimpanzé e della nostra specie, mostrano soltanto pochi cambiamenti a livello molecolare. Dal numero di queste differenze, si può valutare il tempo di divergenza delle forme ancestrali. L'emoglobina umana e quella degli antropomorfi sono notevolmente simili. Alcuni biologi, come Alan Wilson dell'Università della California a

Berkeley, utilizzando la scala macromolecolare, messa a punto per altri animali, hanno concluso che la linea di discendenza degli scimpanzé africani si è staccata dalla nostra solo quattro milioni di anni or sono, e non 15-20 milioni di anni or sono, come si era ritenuto in precedenza.

I primi esseri umani, i cui antenati vissero nel Pliocene da 7 a 2 milioni di anni or sono, assunsero una propria identità nell'epoca successiva, cioè nel Pleistocene. Fu durante questa fase che si susseguirono le glaciazioni e, durante la loro massima estensione, il ghiaccio ricoprì l'Europa centrale, l'Asia centrale e la Siberia. In Inghilterra blocchi di ghiaccio andarono ben oltre il Tamigi, congelando l'acqua del mare. Nell'America settentrionale, i ghiacciai ricoprirono il New England e raggiunsero le regioni attualmente occupate dall'Indiana centrale, dall'Illinois e dall'Ohio meridionale. L'uomo primitivo, in tempi in cui la temperatura era relativamente elevata, si era diffuso dalla sua culla tropicale in una forma che si potrebbe definire "epidemica". Ma, lontano dal punto d'origine, fu colto alla sprovvista e messo a dura prova dal freddo pungente e dalla neve a cui non era abituato. Nei periodi interglaciali ritornava il caldo, ma la fusione delle calotte glaciali provocava inondazioni, che lo facevano allontanare dalle regioni costiere. I giganteschi animali del Pleistocene (ippopotami, mastodonti, rinoceronti e machairodi) erano mammiferi che prediligevano il caldo e che, diversamente dall'uomo, non superarono l'ultima prova del freddo, del ghiaccio e della neve, nel Pleistocene. Inseguiti da uomini affamati, che li cacciavano in appostamento, vennero sostituiti da una nuova fauna. Il bue muschiato, il mammut lanoso, il rinoceronte lanoso, il lemmo, il bisonte, l'uro, il caribù e altri animali di climi freddi fecero la loro comparsa dietro la pressione del gelo persistente. Il nostro retaggio è tropicale, ma noi siamo figli delle glaciazioni.

Non c'è un accordo preciso per quanto riguarda le date delle glaciazioni. Dalla più lontana nel tempo alla più recente, esse sono denominate Gunz (con inizio circa 700000 anni or sono), Mindel, Riss e Wurm. Questi periodi europei di massima estensione dei ghiacci corrispondono grosso modo al Nebraskiano, all'Illinoisiano, al Kansiano e al Wisconsiniano dell'A-

merica settentrionale. I periodi interglaciali o caldi tra le glaciazioni sono noti come Gunz/Minde., Mindel/Riss e Riss/Wurm. L'ultima glaciazione ebbe, probabilmente, il suo massimo appena 18000 anni or sono. Stiamo ancora uscendo da questo inverno esteso a tutto il globo.

La documentazione più impressionante di insediamenti umani continui si trova oggi nelle regioni aride e assolate dell'Africa orientale, nella gola di Olduvai. Da circa due milioni di anni (cioè dall'inizio del Pleistocene e prima delle glaciazioni più recenti), questa località equatoriale è sempre stato un insediamento abitativo di primissimo ordine.

In quella che è oggi la Tanzania, la grande gola di Olduvai ha continuato a rivelare resti fossili. Possiamo oggi rappresentarci il tanto apprezzato sistema didattico di Olduvai, con i suoi "corsi" elementari, medi e superiori di costruzione degli utensili. Il modellamento degli utensili in pietra costituisce la più antica industria umana, il germe della tecnologia. Sono stati dissotterrati ciottoli arrotondati usati per produrre, mediante percussione, altri utensili e incudini, pezzi di roccia utilizzati per poggiarvi le pietre che dovevano essere scheggiate. Sono stati anche trovati schegge di pietra e altri frammenti, sui quali non era stato effettuato alcun intervento. Con termine fantasioso, d'origine francese, sono stati chiamati *débitage*, che significa alla lettera "ritagli rimasti dalla lavorazione del legname". Probabilmente venivano utilizzati per tagliare la carne o il legno. Anche rocce vulcaniche, che venivano utilizzate tenendole in mano, sono state considerate, benché non lavorate, come manufatti perché, per quanto fosse, venivano trasportate dai luoghi d'origine ai luoghi dove poi furono trovate, talvolta a grandi distanze.

In alcuni siti fortunati, nella gola di Olduvai, si possono ricostruire intere scene. Nella parte inferiore dello "strato II", fu scoperto uno scheletro di *Deinotherium*, un elefante estinto, rimasto intrappolato in una palude. Si hanno prove che anche il mammut sia rimasto bloccato con una delle sue grandi zampe. Gli ominidi gli tagliarono la testa, schiacciarono il cranio e lasciarono uno dei loro ciottoli scheggiati conficcato nelle ossa del bacino. Non c'è dubbio che avessero banchettato con i re-

sti di quella povera bestia rimasta impantanata. Non vi sono, invece, resti di scheletri umani; a quanto pare, i cacciatori evitavano di entrare essi stessi nella palude.

Non si sa se questi ominidi appartenessero al genere *Australopithecus* o fossero, piuttosto, membri del genere *Homo*. Ma doveva trattarsi sicuramente di esseri sociali. Erano chiaramente coraggiosi e robusti. Erano più versatili nell'attività che svolgevano di qualsiasi burocrate o artigiano del giorno d'oggi. Ma, benché meno specializzati, questi cacciatori dello "strato II" erano come i lavoratori del giorno d'oggi: dipendevano dai loro consimili per il cibo. Non banchettavano da soli Nessun uomo, per quanto eroico, catturava da solo un mammut. Dato che cacciavano insieme, gli ominidi dovevano avere l'abitudine di condividere il cibo. La condivisione del cibo viene considerata catalizzante nello sviluppo della cultura e della civiltà umane. Nella narrazione della storia dell'uomo, la condivisione del cibo è stata contrapposta allo sviluppo delle asce di pietra e delle punte di lancia. Il critico culturale e storico William Irwin Thompson ha così riassunto le differenze tra queste due prospettive:

«Un gruppo di antropologi sostiene che sono state le armi a renderci uomini. Quando prendemmo in mano gli utensili in pietra, precipitammo dall'innocenza animale e ci trovammo di fronte alla natura, armati della prima tecnologia. Ci lanciammo su un nuovo livello tecnologico e tutto ciò che lasciammo indietro era primitivo. Così, in questa visione, la cultura umana è creata e determinata dalla tecnologia e la tecnologia più fondamentale di tutto sono le armi... Fortunatamente, esiste un'altra visione scientifica delle origini umane, una visione associata al lavoro dell'antropologo Glynn Isaacs. Secondo questa teoria, i protoominidi usavano trasportare il cibo in un riparo sicuro e qui, in un atto che suggellava il fatto di essere una comunità, condividevano il cibo. Da questa prospettiva, l'atto primario della cultura umana è la condivisione del cibo. E, nell'esempio che abbiamo riportato, possiamo proprio vedere che, condividendo il cibo con altri, realizziamo veramente la parte fondamentale della nostra umanità.»[35]

Gli ominidi di Olduvai mangiavano bene e, di notte, dormivano con le loro donne. Certamente queste misero al mondo

figli sani. Di questi figli, almeno alcuni dovettero imparare dai genitori a fabbricare e a utilizzare gli utensili. Gli ominidi di Olduvai, però, dovevano condividere non solo il cibo, ma anche i piani di caccia. Probabilmente, quelli che tenevano a mente questi piani ed eseguivano il loro compito secondo il programma continuavano a mangiare bene. Quelli che programmavano la loro attività e condividevano il cibo che ne ricavavano ebbero figli che mangiavano bene. L'evoluzione li sottopose, con tutta probabilità, a prove e loro le superarono, lasciando un maggior numero di figli rispetto ad altri ominidi, appartenenti a bande socialmente meno coordinate.

La civiltà moderna può essere considerata un'estensione dell'abilità e dell'intelligenza che si svilupparono nei nostri antenati antropomorfi. La socializzazione dei primi uomini, imposta dalle glaciazioni, fu un processo rigoroso e inesorabile. Dal fabbricare con arte e condividere oggetti naturali al cacciare e indossare le pellicce degli orsi delle caverne e dei gatti di montagna, gli uomini hanno imparato a superare in astuzia grossi e minacciosi mammiferi. Buona parte della coesività del clan e le corse all'inseguimento di grosse bestie elefantine attraverso le antichissime pianure sono state conservate nelle culture moderne. Metamorfosandosi, queste strategie per la sopravvivenza, che sono dotate di notevole successo, hanno corollari moderni in sport di gruppo e nella guerra. Nel gioco del calcio, la caccia sembra ridotta all'atto simbolico di gruppi di uomini che inseguono un oggetto fatto di pelle di animale. La palla è lanciata in aria, come fosse una saetta che deve raggiungere un bersaglio. Così anche l'attività della guerra non è diminuita, ma si è estesa. I nostri antenati balbettanti e gesticolanti diedero la caccia a importanti specie di grossi mammiferi fino a farli estinguere. Oggi, lo slancio con cui viene praticata la caccia della grossa selvaggina ha portato la nostra specie sull'orlo dell'autoestinzione. Come scrive Thompson: «Il tecnologo può rivolgersi all'umanità tradizionale per dirle: "Siamo i migliori; i più progrediti; voi siete semplicemente i resti abbandonati di una vecchia natura animale". Per costoro la corsa agli armamenti non è né un male necessario né una patologia peculiare; è la forza motrice della stessa evoluzione umana.»[36] In

realtà, l'evoluzione umana, come ogni evoluzione, presentava entrambi gli aspetti: la condivisione e l'eccidio, la competizione e la cooperazione.

Il linguaggio è un'arma altrettanto temibile della punta più acuminata di un'ossidiana scheggiata. Possiamo immaginare lo sviluppo accidentale, lentamente rinforzato, del linguaggio tra i popoli primitivi. Suoni di godimento vocale sarebbero emessi da membri della comitiva di cacciatori, che mangiano con cautela, di notte, attorno a un fuoco. Questi suoni, ripetuti, divennero nomi che rappresentavano cose. Per esempio, la parola "mammut" potrebbe essere sorta allorché uno dei cacciatori fece schioccare le labbra ed espresse con un grugnito la propria approvazione. La parola sarebbe ricordata e associata a visioni, suoni e odori da coloro che partecipavano al banchetto, alla battuta di caccia, o meglio ancora, a entrambi.

Da tutto ciò si sviluppò un vocabolario primordiale. Qualunque vocabolario è meglio di niente e ha un valore di sopravvivenza. Coloro che avevano in comune il maggior numero di parole potevano comunicare tra loro e organizzare la migliore tra le battute di caccia, non soltanto come quadrupede da pelliccia cacciato, ma anche in rapporto l'una cosa all'altra. Non sappiamo perché i nostri antenati abbiano sviluppato una protolaringe, che in seguito sarebbe diventata lo strumento del linguaggio. Ma ciò faceva parte del bagaglio fisico degli ominidi che avrebbero avuto successo, requisito indispensabile per l'arma micidiale della comunicazione verbale.

Sulle pareti di roccia furono fatti scarabocchi con il sangue di animali. Questi graffiti primitivi, celebrazione naturale della caccia, furono associati fisicamente alla caccia stessa; ma, con il passare del tempo, il dito che dipingeva si evolvette dando semplici rappresentazioni dell'avvenimento. Quella magia interdipendente divenne simbolismo. Il succo di bacche rosse schiacciate significava sangue. Configurazioni di pigmenti divennero animali durante la caccia. Con la manipolazione dei simboli in varie sequenze, gli esseri umani cominciarono a esplorare le possibilità delle eventuali realtà.

Con il trascorrere dei secoli, le rappresentazioni grossolane si fecero più chiare e semplificate. Alcuni segni ritualistici di-

vennero i geroglifici (simboli pittorici) e gli ideogrammi (simboli pittorici con correlazioni sonore) delle civiltà egizie e orientali. Nei rebus l'ordinamento delle figure rappresenta suoni espressi con la parola e oggetti che si trovano in natura. Il simbolismo più astratto dei linguaggi alfabetici moderni ha sostituito nel tempo molte di queste forme di linguaggio. Grida di avvertimento, grugniti di comunicazione e scarabocchi ricchi di significato hanno accresciuto la possibilità di sopravvivenza di coloro che se ne servivano. Simboli comuni hanno riunito comunità umane diverse attorno a totem, immagini religiose e altri pezzi di natura astratta. Gli egizi avevano un dio chiamato il "Progettatore" ed è ragionevole supporre che i raccoglitori-cacciatori disegnassero mappe e segnassero il movimento dei pianeti e delle stelle fin da 40000 anni or sono.

Esseri umani avevano esplorato il Vecchio Mondo insediandovisi fin da 30000 anni or sono. In Algeria, in un sito chiamato "Riparo tra le rocce n. 34 di Afalou-Bou-Rhummel", sono stati trovati scheletri vicino a utensili mousteriani, prodotti da una cultura neanderthaliana franco-germanica. Questi utensili sono fatti con pezzi di ossidiana, un vetro vulcanico nero naturale. Scheggiati in forma di asce a mano (bifacciali) e di punte di lancia con margini dentellati, essi vengono considerati appartenenti al Paleolitico. A Boskop, in Sudafrica, frammenti di uno scheletro umano, una mascella e alcune parti di ossa degli arti, sono stati trovati assieme a utensili.

A Predmost in Moravia sono stati dissotterrati resti appartenenti a una trentina circa di persone. Queste sepolture erano intenzionali: utensili in corno e in osso erano stati lasciati assieme al morto per accompagnarlo. Nel sud della Francia e nel nord della Spagna, sulle pareti di fondo di grotte di natura calcarea, umide e inaccessibili, sono raffigurati stregoni semidei e animali semiumani, testimonianza di culture ricche di arte e di mistero.

Forse i dipinti rupestri più famosi sono quelli delle grotte di Altamira in Spagna e di Lascaux in Francia. Nell'insieme, queste grotte dell'Europa occidentale hanno un'età compresa tra quasi 40000 anni e 10000 anni. I soggetti dei dipinti possono essere cacciatori stilizzati, rappresentati da semplici linee, o

grossi animali estinti, elegantemente disegnati. In alcuni casi compaiono orsi privi di testa e bovini. Per arrivare alla sede di questi dipinti, sia coloro che li dipingevano sia coloro che li avrebbero poi osservati, dovevano strisciare sotto la volta bassa delle caverne e contorcersi lungo passaggi ingombri, presumibilmente portando con sé torce o comunque qualche fonte di luce. I tre fratelli francesi, in ricordo dei quali il loro padre denominò la grotta che avevano esplorato, Grotte des Trois Frères, avevano dovuto percorrerla seguendo un fiume sotterraneo prima di fare la loro incantevole scoperta.

Alle estremità più remote delle pareti della grotta, gli esploratori trovano le impronte delle mani degli antichi artisti. Sulle volte, i visitatori moderni osservano occhi dipinti migliaia di anni or sono con pigmenti all'ossido di zinco. Questi dipinti da soli segnano chiaramente la presenza sulla Terra di un *Homo sapiens* di tipo moderno. Solo uomini come questi dipingono, solo uomini come questi programmano cerimonie che si snodano fino al fondo di grotte buie e umide. Solo uomini come questi seppelliscono con pompa i loro morti. La ricerca dell'antenato storico dell'uomo è la ricerca del narratore e dell'artista che ha raffigurato la storia dell'uomo.

Le razze umane cosiddette moderne sono apparse in epoca così recente che non possono essere fissate su una linea del tempo che includa l'origine della vita. Le differenze tra europei, africani, indigeni americani, vietnamiti, eschimesi, a dire il vero fra tutti i popoli della Terra sono spesso troppo drammatizzate. Poiché ciascuno ha due genitori, quattro nonni, otto bisnonni e via dicendo, e poiché vi sono circa venticinque anni per ogni generazione e, quindi, quattro generazioni in un secolo, siamo portati a concludere che in 40000 generazioni avremmo accumulato un totale di 2^{40000} antenati. Questo numero è di gran lunga superiore al numero totale di persone che siano mai vissute e supera anche di molto le stime più complete che gli antropologi hanno fatto riguardo alle popolazioni umane a livello mondiale, vissute un milione di anni or sono. Se ammettiamo che i vostri antenati vivessero già diecimila anni or sono, questo calcolo può solo significare che molti, in realtà la maggior parte, dei parenti dal lato paterno erano gli

stessi di quelli dal lato materno. Inoltre, significa che, fossero essi cinesi o africani, inglesi o dravidici, i vostri antenati e gli antenati del vostro compagno sono le stesse persone.

Gli esseri umani moderni sembrano essersi diffusi dall'Asia centrooccidentale al Borneo, all'Australia e all'Europa orientale. Fin da 35000 anni or sono essi erano già nell'Europa occidentale; 32000 anni or sono erano nel bacino della Lena, nella Siberia orientale, e nello Zaire, in Africa; 27000 anni or sono erano in Namibia e forse nell'America nordoccidentale; già 19000 anni or sono gli amerindi avevano raggiunto la Pennsylvania e 10500 anni or sono altri amerindi si erano diffusi in parti più remote dell'America meridionale.

Con un volume cranico superiore ai 1500 centimetri cubi e una propensione per l'organizzazione tribale, l'arte poetica e la scaltrezza, tutti gli uomini oggi sono di gran lunga più simili l'uno all'altro di quanto ciascuno di noi possa essere simile ad *Australopithecus afarensis* o a *Homo erectus*. Eppure, nei reperti fossili, è possibile seguire una continuità dagli australopitecini del Pleistocene fino a noi. Ricostruiamo la nostra storia scientificamente partendo dalle mandibole, dai crani schiacciati delle vittime, dagli utensili in pietra e dagli impressionanti dipinti. L'evoluzione dell'uomo ci offre un bell'esempio di darwinismo classico. Nelle popolazioni umane, come in quelle di ogni altra specie, si verificano nel tempo cambiamenti in risposta a pressioni selettive. Si possono seguire i cambiamenti dai primati che mangiavano insetti, frutti e noci ai cacciatori di grossa selvaggina che costruivano giavellotti e asce a mano. Ma la raccolta di un maggior numero di indizi ha portato a una maggiore, anziché minore, difficoltà nel distinguere i diversi stadi della transizione dai piccoli mammiferi notturni arboricoli agli ominidi in grado di avere un'andatura bipede. Si nota una certa continuità che procede dai piccoli antropomorfi del Miocene, che corrono al suolo, agli australopitecini del Pleiocene, a *Homo erectus*, a *Homo sapiens neanderthalensis* e a *Homo sapiens sapiens*.

Nel periodo interglaciale Riss/Wurm (che precedette quello in cui stiamo vivendo oggi), i resti degli ominidi fossili diventano abbondanti. Specialmente in Europa, ma anche nel Vicino

Oriente, nell'Asia sudorientale, nello Zambia, e in Cina, sono stati trovati resti enigmatici di donne e uomini. La "località tipo" dove questa gente venne riconosciuta per la prima volta fu Neanderthal, vicino a Düsseldorf, una valle così chiamata dal nome di un compositore del XVII secolo, Joachim Neander.

I neanderthaliani possono essere riconosciuti dal cranio; il volume medio di esemplari noti supera, in realtà, quello dell'uomo moderno, ma chiaramente nella dimensione sbagliata. Con un viso senza mento, essi avevano per contro un cranio che sporgeva, ma non verso l'alto bensì all'indietro. Presentavano anche mani corte e tozze e probabilmente irsute, con una forte presa. Qualunque altra cosa fossero, erano comunque uomini: erano artisti, poeti e seppellivano i loro morti.

I neanderthaliani furono sostituiti in Europa 35000 anni or sono da gente che fisicamente era così simile alla gente di oggi che, se la si vedesse sulla metropolitana di New York, non attirerebbe lo sguardo più di una volta. Essi si estinsero, forse, senza lasciare discendenti. Alcuni ritengono che si trasformarono gradatamente nei moderni uomini europei di Cro-Magnon, l'*Homo sapiens sapiens*, e altri pensano che i Cro-Magnon abbiano combattuto con loro e abbiano vinto, lasciando una discendenza ibrida che si trasformò negli uomini europei moderni. Altri ancora hanno ipotizzato che i neanderthaliani, non molto diversi dalla gente moderna, si siano trasformati in noi. Le loro massicce arcate sopraccigliari e mandibole, il portamento incurvato e gli arti grossi erano il risultato di differenze ormonali di secondaria importanza.

Proprio come la bassa statura, le gambe tozze e le braccia sottili caratterizzavano i fuegini studiati da Darwin ed effigiati da Roberto Fitzroy durante il viaggio che la nave *Beagle* compì negli anni Trenta del secolo scorso, così il tipo fisico di Neanderthal avrebbe potuto caratterizzare una "razza" dell'antica popolazione umana. L'ibridazione tra neanderthaliani e uomini di Cro-Magnon avrebbe potuto far emergere, al posto delle caratteristiche così spinte dei neanderthaliani, caratteristiche a noi più familiari. Lucy, se fosse vestita e non mostrasse distintamente la sua faccia da scimpanzé, potrebbe essere presa per una mendicante rattrappita. *Homo habilis* sembrerebbe affetto

da una grave forma di artrite e *Homo erectus* solo leggermente ricurvo. Ma i neanderthaliani e i Cro-Magnon sono, a tutti gli effetti, uomini come noi. Quando concludiamo il racconto sulla gente del tardo Pleistocene, cominciamo a raccontare la nostra stessa storia. La domanda diventa allora: Se da almeno 30000 anni abbiamo dipinto le pareti delle caverne e abbiamo progettato la costruzione di manufatti, quanto tempo passerà prima che *Homo sapiens sapiens* diventi qualcosa di diverso? Quando una specie futura si girerà indietro e guarderà verso di noi, riconoscendoci come *suoi* predecessori?

Naturalmente non esiste una risposta definitiva. I paleontologi che studiano i resti fossili degli invertebrati, in particolare di animali marini, e i paleontologi che studiano i vertebrati (pesci, anfibi, rettili, uccelli e mammiferi) hanno concluso che specie ben distinguibili di vertebrati che lasciano una documentazione fossile chiaramente riconoscibile tendono a persistere circa un milione di anni. Le specie di invertebrati durerebbero, invece, più a lungo, circa undici milioni di anni. Si può sostenere che gli esseri umani, come *Homo sapiens sapiens*, una sottospecie di vertebrati, abbiano un'età di almeno 100000 anni. Così abbiamo ancora davanti a noi più di mezzo milione di anni. Si può anche pensare che l'umanità vivrà per sempre. Ma l'idea che gli esseri umani non siano più soggetti al processo evolutivo è altrettanto irrazionale quanto credere in Babbo Natale. C'è da aspettarsi che la nostra specie sarà sostituita, entro un milione di anni circa, da una o due specie discendenti. C'è da aspettarselo sulla base delle conoscenze che abbiamo accumulato riguardo a *tutte* le altre specie.

I nostri antenati, con la loro particolare inclinazione per la cultura, giunsero su una scena dominata dai microbi e iniziatasi molto tempo prima. La patina planetaria, cioè lo strato sottostante di batteri, si era da tempo estesa verso l'esterno in proporzioni macrocosmiche soprannaturali. Le prime popolazioni umane si diffusero dal loro apparente punto di origine nell'Eden tropicale dell'Africa (Vecchio Mondo). Gli ominidi si espansero come *Homo erectus* e *Homo habilis* più di mezzo milione di anni or sono; i loro discendenti, *Homo sapiens*, si dispersero in numero enorme dall'Asia centrale più di 50000

anni or sono. Protetti da abiti caldi, da abitazioni e con le loro capacità, ampiamente differenziate, di pensare e operare insieme in collettività sociali, i nostri antenati procrearono e crearono, dominarono e predominarono. Impararono a selezionare e a coltivare le piante, a superarsi in astuzia l'un l'altro e a insegnarsi reciprocamente. Divennero sempre più mammiferi intelligenti e sociali. Impararono a sancire con una cerimonia il trasferimento dell'informazione ai loro figli. Lo fecero con i sistemi simbolici astratti dell'arte, del linguaggio, della magia, della scrittura, della religione, della logica e, a partire da almeno 2600 anni or sono, con Talete in Grecia, della scienza.

Una volta fatta la loro apparizione, gli esseri umani salparono per la poco accogliente costa del New England; traversarono a piedi gli sterili deserti arabici; remarono e risalirono lungo i profondi fiordi della Scandinavia, fino a giungere alle pianure a nord di essi, raggiunsero in canoa le inaccessibili isole dell'Oceano Pacifico e, per finire, si spinsero fino alle calotte polari. Si diffusero, in pratica, dovunque. Eppure, a parte la fecondità, la persistenza, l'immaginazione e la verbosità, c'è alla fine ben poco di molto grande o di diverso in *Homo sapiens sapiens*. Una cosa da niente in mezzo ai mammiferi, con tutte le nostre realizzazioni e la nostra personalità, siamo ancora il risultato di lunghissimi periodi di ricombinazione microbica. Con i mitocondri coinvolti nella respirazione, che utilizzano l'ossigeno per fornire energia, e sistemi di motilità modificati, che elaborano le informazioni sensoriali afferenti, assomigliamo a qualunque altro animale. Ci vantiamo che le pitture rupestri di Lascaux siano state eseguite da quella rara specie che, presumibilmente, scese dagli alberi e stette eretta guardando la Luna. Ma tutto questo è culto dell'eroe, è antropocentrismo. Certamente possiamo scusarlo, ma sarebbe più obiettivo presentare gli stessi eventi in un altro modo: con i mitocondri sede degli scambi respiratori e le spirochete "agenti segreti" implicati nella divisione delle cellule, le comunità del *microcosmo* sono discese, anche se per poco, sulla Luna.

L'espansione extraterrestre dell'antico micromondo è già cominciata. Ma ciò non significa affatto che noi siamo una sorta di specie prescelta. Anzi, alcuni scienziati ritengono che

il nostro fantastico recente successo nel popolare il pianeta sia "un fenomeno da tramonto": le luci abbaglianti prima dell'inevitabile fine dello spettacolo. Come suggerisce il biologo A. Meredith, una documentazione fossile in cui a un'improvvisa comparsa segua un periodo di espansione e poi una scomparsa ha molti precedenti storici e non è di buon auspicio. La lezione offerta dal passato fossile ammonisce che forme di vita che hanno superficialmente un estremo successo sono spesso al loro estremo limite biologico. Storicamente, le specie immediatamente prima della loro estinzione spesso si riproducono con notevole profusione. Le molte specie di archeociatidi e di trilobiti nel Cambriano, e dei dinosauri nel Cretaceo, sono la dimostrazione di questo infausto processo, che Meredith chiama "devoluzione". Come capì esattamente Darwin, gli organismi si adattano al loro ambiente grazie a costanti controlli sulla loro tendenza verso una crescita illimitata. Se non sono adattati, possono declinare numericamente ed estinguersi. Ma, secondo Meredith, possono anche adattarsi *troppo*, moltiplicarsi, esaurire le risorse e *di conseguenza* estinguersi.

Un esempio microcosmico di devoluzione sarebbe costituito da microbi coltivati su piastra di Petri. (Le piastre di Petri sono, in pratica, scatole di vetro trasparente, rotonde, costituite da un coperchio e da una base leggermente più piccola che si incastra in esso e nella quale viene posto il terreno colturale trasparente e chiaro, che permette al ricercatore di vedere le colonie microbiche come macchioline osservabili anche a occhio nudo.) Alimentati su agar contenente sostanze nutritive specifiche (l'agar è una sostanza gelatinosa che si estrae da alghe marine e che ha una funzione di consolidamento), i microbi mostrano la massima profilicità nelle generazioni immediatamente precedenti il loro collasso. Esaurendo tutte le sostanze nutritive presenti nell'agar e raggiungendo i bordi della piastra di Petri, i parecchi miliardi di batteri cessano improvvisamente di moltiplicarsi e muoiono per mancanza di cibo e di spazio vitale. Per noi, il mondo potrebbe essere una specie di piastra di Petri. In effetti, immagini riprese da satellite della città di Spokane, nello stato di Washington, mostrano tipi di sviluppo urbano simili alla crescita di colonie di microbi. Dal punto di vi-

sta della teoria di Meredith, è facile vedere che le implicazioni della crescita della popolazione umana non sono necessariamente sinonimo di progresso.

Accettando di non essere superiori agli altri organismi, ma uguali a essi (proprio ricombinazioni diverse degli stessi antichi antenati microbici), possiamo desiderare di fare marcia indietro e di instillarci di nuovo un poco di orgoglio. L'evoluzione sta accelerando. Sembra che l'antico microcosmo batterico sia sull'orlo di cambiamenti così importanti come non ne ha mai avuti nella sua storia. Benché mediato al presente dagli esseri umani, vi sono scarse garanzie che continueremo a essere i suoi agenti in futuro. Tanto per cominciare, i progressi tecnologici dopo la seconda guerra mondiale sono stati sorprendenti. John Platt, un esperto di teoria generale dei sistemi a Cambridge, nel Massachusetts, ha studiato il fenomeno dell'accelerazione dell'evoluzione e ha contribuito a formularne la teoria.[37]

Platt ritiene che la vita sulla Terra potrebbe avvicinarsi "alla svolta decisiva entro quattro miliardi di anni". Egli traccia una serie di rigidi confronti, in numerose aree, tra vita precoce e tecnologia attuale. Dovunque l'impressione è la stessa: il microcosmo, come noi, sta acquistando velocità in modo così rapido che è impossibile sapere che cosa potrà accadere anche in uno spazio di tempo geologico estremamente breve. Innanzitutto, consideriamo la stessa evoluzione. Nell'evoluzione, gli effetti gratuiti dell'ibridazione possono oggi essere imitati e diretti consapevolmente dalle tecniche della biologia molecolare e del DNA ricombinante. Platt considera questo fatto un progresso significativo nella domesticazione e nell'allevamento animale e osserva le ramificazioni biotecnologiche "che si svolgono per migliaia o milioni di anni".

Nella conversione dell'energia, Platt scopre un costante progresso dalla fotosintesi, due milioni di anni or sono, all'utilizzazione alimentare delle piante, circa un milione di anni or sono, all'uso del fuoco, 400000 anni or sono, all'agricoltura, 10000 anni or sono, fino ai metodi più moderni di sfruttamento dell'energia di origine fotosintetica, rimasta bloccata nel carbone e nel petrolio. La vita ha molte più astuzie oggi: le cel-

lule fotovoltaiche offrono un modo per sfruttare direttamente l'energia solare, mentre la fissione e la fusione nucleari possono riprodurre quel tipo di reazioni atomiche che si svolgono innanzitutto nel Sole per produrre energia dalla materia.

Si possono anche identificare i progressi che la vita compie nell'incapsulare se stessa e spostarsi in nuovi habitat. Questo percorso ha inizio con le prime cellule vissute in acqua. Quindi emerse la vita pluricellulare sulla terraferma: una vita protetta da rivestimenti come la pelle, gusci e conchiglie o, nelle piante, la corteccia. Questo accadde circa 600 milioni di anni or sono. L'uso di abiti e di altri manufatti, nelle ultime poche migliaia di anni, consentì all'uomo di spostarsi in ogni tipo di clima, per fondare città su tutti i continenti, e di spingersi nella "frontiera" occidentale a partire da 600 anni or sono. La crescente sofisticazione degli habitat ha raggiunto il massimo in ciò che Platt chiama la "trasformazione attuale" di spedizioni preliminari nello spazio, nelle zone polari ricoperte di ghiacci, sulla terraferma e nei mari, il tutto in abitacoli appropriati che variano dai pozzi di miniera ai veicoli spaziali, ai sottomarini. L'ultimo esempio in assoluto di complessità dell'habitat può essere "Biosphere II", un sistema aperto sotto il profilo energetico e informazionale in funzione dal 1989 vicino a Oracle, in Arizona. Oltre che per gli studi sulla Terra, questa struttura serve da prototipo per voli spaziali e per stazioni nello spazio che possano riciclare i propri rifiuti, svincolandosi così dalla necessità di ricevere materiali dal pianeta Terra.

I metodi di locomozione, naturalmente, hanno subito un'accelerazione: dal moto cellulare e dalle spirochete, 3 miliardi di anni or sono, ai sistemi muscolari come le pinne, gli arti dei tetrapodi terrestri e le ali degli uccelli, 300 milioni di anni or sono. Nel trasporto umano, la prima modalità distinta fu probabilmente, 50000 anni or sono, l'uso di imbarcazioni, che si estese, 5000 anni or sono, all'uso di cavalli e di carri con ruote. Negli ultimi duecento anni, queste modalità furono integrate dalla costruzione di strade ferrate, di automobili, di aeroplani e aviogetti, infine di veicoli spaziali riutilizzabili come la navetta spaziale dell'attuale periodo di trasformazione, avviatosi a partire dalla fine della seconda guerra mondiale. Utensili

e armi hanno subito anch'essi un'accelerazione dalla fase chimica del microcosmo primitivo, ai denti e artigli degli animali, circa un miliardo di anni or sono, alle macchine, ai cannoni e agli esplosivi dell'epoca moderna, alle terrorizzanti armi nucleari dell'attuale trasformazione, programmabili e controllate a distanza.

Una volta che andiamo oltre la dimensione fisica dell'artefatto, o hardware biologico, verso quella che potrebbe essere chiamata rielaborazione dell'informazione biologica o software, il salto diventa ancora più vertiginoso. Si può, per esempio, scoprire un'accelerazione nei sistemi di percezione.

Centinaia di milioni di anni or sono, i batteri magnetotattici, dotati di minuscole sbarrette interne di magnetite, nuotavano verso nord (verso il polo nord magnetico) nell'emisfero boreale e verso sud (verso il polo sud magnetico) nell'emisfero australe. I sistemi chimici di identificazione e segnalazione dei batteri, tre miliardi e mezzo di anni or sono, si arricchirono nei protisti, circa un miliardo di anni or sono, della formazione e dell'elaborazione dell'immagine a livello cellulare. Non vi è alcun dubbio che almeno due differenti protisti, i dinomastigoti *Neodinium* ed *Erythrodinium*, abbiano "occhi" per vedere. Con analoghi di lenti e retine, questi occhi degli unicellulari stanno in guardia per percepire la presenza di nemici subacquei. Già 100 milioni di anni or sono, erano ben sviluppati i sistemi di organi per l'olfatto, l'udito, il gusto, la sensibilità elettrica e l'ecolocalizzazione. L'accelerazione percettiva proseguì circa un milione di anni or sono nei primi uomini con il linguaggio, per poi continuare diverse migliaia di anni or sono, in quelli che vengono considerati tradizionalmente gli albori dell'umanità, con la scrittura, in età moderna con il telefono e la radio, fino a un'esplorazione preliminare dello spettro elettromagnetico, che include radar, laser e televisione.

Forse più grandi di tutto sono però due serie di salti che la vita ha compiuto, nella risoluzione dei problemi e nell'immagazzinamento delle loro soluzioni, e nei meccanismi di cambiamento. Poiché le due serie si sovrappongono, le tratteremo insieme.

La risoluzione dei problemi ebbe inizio quattro miliardi di

anni or sono per mezzo della mutazione e ricombinazione di catene di DNA procariotico. La selezione naturale, conservando i batteri e i loro discendenti che rispondono nel modo più efficiente all'ambiente, immagazzinò soluzioni ai problemi del surriscaldamento, della siccità e delle radiazioni ultraviolette. L'immagazzinamento avveniva in forma di seguenze informazionali di acidi nucleici e di capacità di questi acidi nucleici, RNA e DNA, di interagire con le proteine nelle loro immediate vicinanze. Mediante trasferimento di repliconi, come è già stato spiegato nel capitolo 5, il crescere della quantità d'informazione immagazzinata nelle sequenze degli amminoacidi e delle coppie di basi di queste molecole biochimiche a catena lunga potrebbe essere seguito essenzialmente fin dalle origini della vita.

Circa 700 milioni di anni or sono, l'evoluzione dei primi sistemi nervosi e cervelli schiuse la via all'apprendimento e al pensiero, un mezzo più rapido di risoluzione dei problemi, che operava a livello individuale. Il nuovo sistema neuronale di soluzione dei problemi operava non con i metodi darwiniani della morte individuale, o addirittura per scambio genetico, ma con metodi di cui si occupa lo psicologo B.F. Skinner, cioè mediante la modificazione del comportamento. Invece di essere immagazzinato nel DNA, il comportamento variabile e il rinforzo selettivo da parte dell'ambiente venivano immagazzinati in interazioni selettive tra cellule eccitabili o neuroni, i quali rispondono direttamente all'ambiente. (Come abbiamo visto nel capitolo 9, i sistemi nervosi possono essere basati in ultima analisi sulla locomozione batterica.) Dai primordi dell'umanità a oggi il cervello si è triplicato come volume, crescendo all'incirca del 100% ogni milione di anni.

Un ulteriore salto nella risoluzione dei problemi fu la scienza, che viene in genere fatta risalire agli elleni di solo 2600 anni or sono. Ma, probabilmente, la formulazione di leggi generali su come funziona il mondo risale molto più indietro nel tempo, nella sua essenza, fino ad arrivare al primo *Homo sapiens sapiens* moderno, 50000 anni or sono. La scienza è diventata un metodo sociale di indagine sui fenomeni naturali, esplorando in modo intuitivo e sistematico leggi che sono for-

mulate osservando la natura e, quindi, saggiandone rigorosamente la precisione in forma di previsioni. I risultati sono quindi immagazzinati come dati scritti o matematici, che vengono copiati e disseminati sia nell'ambito di una data generazione sia al di fuori di essa. Come una sorta di percezione di gruppo sinergica, regolata rigorosamente, l'impresa collettiva della scienza trascende di gran lunga l'attività che si svolge all'interno di un singolo cervello.[38]

Applicazione pratica della scienza sono la ricerca e lo sviluppo, che forniscono cose come il progetto di costruzione della bomba atomica, il lancio di un uomo sulla Luna, l'iniziativa di difesa strategica (SDI, S*trategic* D*efense* I*nitiative*), per costituire uno scudo di raggi laser sopra gli USA, oppure l'istituzione di stazioni spaziali nell'orbita terrestre con fiumi e giardini. (Gli ultimi due esempi, naturalmente, sono ancora allo stadio di progettazione.) Come scrive Platt: «Oggi l'informazione viene manipolata al cuore della scienza, della tecnologia, delle azioni belliche, delle attività bancarie, degli affari, della contabilità sociale e di molte e molte altre attività della nostra vita quotidiana. È come se vi fosse un sistema nervoso sociale collettivo per gestire milioni di nostri problemi e la sua importanza per il futuro a lungo termine può essere altrettanto grande di quella dei primi sistemi nervosi in grado di apprendere.» Platt descrive la ricerca e lo sviluppo in grande scala, una spesa che può raggiungere l'un per cento del prodotto interno lordo, come un processo di «invenzione di salti evolutivi, con un salto che può essere altrettanto grande quanto l'evoluzione originale del pensiero stesso.»

Considerando questi esempi di accelerazione evolutiva, non possiamo non esserne sgomenti. Sembra che certi fenomeni, che ebbero inizio nel tenebroso abisso dell'Archeano, si siano poi espansi e abbiano acquisito velocità da quattro miliardi di anni. Essi si sovrappongono tra loro, convergono, traggono alimento l'uno dall'altro e prendono a prestito l'uno dall'altro. Come i simbionti del microcosmo, possono riprodursi e ricombinarsi per diventare qualcosa di molto di più della semplice somma delle loro parti costituenti. Ma solo in retrospettiva sarà possibile determinare se l'accelerazione evolutiva os-

servata da Platt fosse un presupposto per cose maggiori o semplicemente un bel fenomeno di declino: la via senza sbocco della devoluzione di Meredith. Noi tendiamo a imboccare una strada intermedia, ritenendo che l'umanità sia, di fatto, appena una fase, ma una fase importante che sarà inclusa anche in forme future di organizzazione vivente.

Capitolo 13

Il supercosmo futuro

Come i caratteri della personalità di un adulto si sono formati in un'infanzia ormai dimenticata, così l'umanità e il posto che essa occupa nella storia possono essere compresi solo quando si esplora, dandogli un significato, il nostro passato cellulare. Piante e animali sono configurazioni di cellule nucleate. Queste cellule nucleate traggono la loro origine dai batteri simbionti del microcosmo, ma formano il nostro essere che fa parte del macrocosmo. La vita sulla Terra dovrà evolversi in modo da poter vivere su altri pianeti, o anche, forse, attorno ad altri Soli. E, se sopravviveremo, dovremo certamente cambiare, diventando parte di un "supercosmo" futuro: l'ipotetica, ininterrotta espansione della vita dalla Terra nel sistema solare e oltre. L'enorme aumento di superficie e di risorse darà via libera a tutte le potenzialità della Terra, rendendo il supercosmo tanto diverso dal nostro mondo quanto noi lo siamo dai batteri.

Gli esseri umani, avendo il monopolio sull'alta tecnologia all'interno del regno animale, sembrano i più probabili candidati a far espandere la vita in tutto il sistema solare, se non oltre. Ma non è un fatto scontato che essi saranno gli agenti finali dell'espansione del microcosmo nello spazio. Per esempio, l'elaborazione dell'immagine visiva sotto forma di occhi si è evoluta molte volte; si è sviluppata nei protisti, nei vermi marini, nei molluschi (come le lumache e i calamari), negli insetti e nei vertebrati. Le ali si sono evolute indipendentemente negli

insetti, nei rettili, negli uccelli e nei chirotteri (pipistrelli): sorsero analoghi progetti aerodinamici per fronteggiare analoghe situazioni di emergenza nell'aria. Questa tendenza degli organismi a evolvere in direzioni simili, malgrado il fatto che abbiano antenati recenti diversi, si chiama convergenza. Essa fa pensare che molti tipi di esseri viventi si espanderanno nello spazio, proprio come molti tipi si spinsero sulla terraferma e nell'atmosfera. Ma proprio come i primi dipnoi, che uscirono dall'acqua ma non si evolvettero mai negli antenati degli animali terrestri, il nostro flirtare con lo spazio non si consumerà mai in una vita imperitura altrove. La presenza di sistemi nervosi e di un comportamento comunitario in molti tipi di animali suggerisce l'idea che, se gli esseri umani falliranno, altre forme di vita si evolveranno per trasportare il microcosmo primordiale fuori dal nostro pianeta. Se gli esseri umani si estingueranno (o, come il limulo e il dipnoo, rimarranno felicemente nel loro habitat attuale), il bioma terrestre, complesso di flora e fauna terrestri, per una volta, potrà rimanere confinato sulla Terra. Ma si ricordi che gli esseri umani impiegarono solo alcuni milioni di anni a evolversi. Anche se tutti gli antropoidi (tutti gli esseri umani, tutte le scimmie e le scimmie antropomorfe) si estinguessero, il microcosmo abbonderebbe ancora di quelle risorse (sistemi nervosi, appendici in grado di manipolare, eccetera), su cui venne fatta leva per giungere innanzitutto all'intelligenza e alla tecnologia. Concedendo loro il tempo sufficiente per evolversi in assenza di esseri umani, i discendenti dei procioni (mammiferi notturni intelligenti, con una buona coordinazione manuale) potrebbero avviare il loro programma spaziale. Prima o poi è probabile che la biosfera si espanderà oltre la culla chiamata Terra.

È una caratteristica illuminante del microcosmo che gli avvenimenti dirompenti del passato geologico non abbiano *mai* portato alla *totale* distruzione della biosfera. In verità, come un artista, la cui miseria "catalizza" la creazione di splendide opere d'arte, sembra che estese catastrofi abbiano sempre immediatamente preceduto importanti innovazioni evolutive.

La vita sulla Terra risponde alle minacce, agli oltraggi e alle

distruzioni con innovazioni, con lo sviluppo e la riproduzione. La disastrosa perdita dell'idrogeno necessario dal campo gravitazionale terrestre produsse una delle massime innovazioni evolutive di tutti i tempi: l'impiego dell'acqua (H_2O) nella fotosintesi. Ma provocò anche un tremendo inquinamento, sotto forma di accumulo del gas ossigeno, originariamente tossico per la grande maggioranza degli organismi viventi su questo pianeta. La crisi dell'ossigeno, un milione di anni or sono, cagionò tuttavia l'evoluzione di batteri che respiravano utilizzando ossigeno per ottenere energia biochimica in modo più efficiente di prima. Questi batteri erano simbionti e si fusero con altri batteri per formare cellule eucariotiche, le quali, moltiplicandosi e dando origine a organismi pluricellulari, si evolvettero in funghi, piante e animali. Le estinzioni in massa più gravi che il mondo abbia mai conosciuto, al limite tra Permiano e Trias, 245 milioni di anni or sono, furono rapidamente seguite dall'ascesa dei mammiferi, dotati di una vista acuta e di un grosso cervello ricettivo. La catastrofe del Cretaceo, inclusa la scomparsa dei dinosauri, 66 milioni di anni or sono, spianò la strada allo sviluppo dei primi primati, il cui complesso coordinamento tra occhi e mani condusse alla tecnologia. La seconda guerra mondiale introdusse il radar, le armi nucleari e l'era elettronica. E l'olocausto di Hiroshima e Nagasaki, più di quarant'anni or sono, decimò l'industria e la cultura giapponesi, schiudendo involontariamente la via a un nuovo filone sotto forma di Sol Levante dell'impero informatico giapponese.

A ogni crisi sembra che la biosfera compia un passo indietro e due in avanti (i due passi in avanti sono una soluzione evolutiva, che supera i limiti del problema originale). Non solo il misurarsi con le sfide, ma anche l'andare oltre a esse conferma che la biosfera ha una notevole capacità di ripresa, che è in grado di riemergere dalle tragedie con rinnovato vigore. Una conflagrazione nucleare nell'emisfero boreale ucciderebbe centinaia di milioni di esseri umani. Ma non sarebbe la fine della vita sulla Terra e, per quanto spietato ciò possa sembrare, un Armageddo umano potrebbe preparare la biosfera per forme di vita meno incentrate su se stesse. Questi esseri futuri, tanto

differenti da noi quanto noi lo siamo dai dinosauri, potrebbero evolversi attraverso la materia, la vita e la consapevolezza fino a un nuovo stadio di organizzazione superordinato e, nel far ciò, considereranno gli esseri umani tanto impressionanti quanto noi stessi consideriamo le iguane.

È inutile dire che una simile visione offre solo una consolazione metafisica. Sbarrando un attacco diretto con un'arma atomica, che naturalmente è letale, bastano 10 microgrammi, cioè 10 *milionesimi* di grammo, di ricaduta radioattiva (i detriti che si formano nell'esplosione passano nella stratosfera, si disperdono nel vento e, in seguito, si depositano) per uccidere una persona. Le stime attuali danno per gli arsenali di bombe nucleari degli USA e dell'Unione Sovietica valori dell'ordine di 10000 *megaton* ciascuno. Come ha dimostrato Buckminster Fuller, lasciando cadere piccoli dischi su una mappa gigante stesa sul pavimento della sala da ballo dello Sheraton Hotel di New York, 5000 bombe lanciate a caso su tutto il globo terrestre paralizzerebbero i principali centri abitati. E, dati gli arsenali in funzione oggi (contrapposti ai futuri progettati), si prevede che una guerra nucleare su scala totale esaurirà dal 30 al 60% dello strato di ozono stratosferico. La polvere e il fumo che si libereranno dagli incendi scoppiati nelle città, si solleveranno e circonderanno la Terra, dapprima surriscaldandola, ma poi portando a una devastante caduta della temperatura media su tutto il globo. Anche le radiazioni provocherebbero in tutto il mondo epidemie di malattie del tipo dell'AIDS in quanto comprometterebbero il sistema immunitario umano. Ciononostante, con tutto questo, dubitiamo che la salute generale e la sottostante stabilità del microcosmo ne sarebbero influenzate. L'aumento di mutazioni indotte dalle radiazioni non avrebbe alcun effetto diretto sull'evoluzione microbica, essendovi sempre stata un'enorme riserva di mutanti resistenti alle radiazioni per rifornire il processo evolutivo. Per esempio, *Micrococcus radiodurans* è stato trovato vivo nell'acqua che serve per raffreddare i reattori nucleari. Neppure la distruzione dello strato di ozono, che permetterebbe l'ingresso nell'atmosfera di torrenti di radiazioni ultraviolette, annienterebbe il sottostrato microbico. Al contrario, probabilmente lo farebbe

aumentare dato che le radiazioni stimolano il trasferimento batterico di geni.

Nel racconto fantascientifico di Theodore Sturgeon, *Microcosmic God*[39] un brillante scienziato, incapace di «togliere la superficie al futuro e immergersi appena in profondità» quando vede qualcosa di interessante, pensa al contrario di inventare la vita in laboratorio. Questa forma di vita, i "Neoterici", che ripetono il percorso evolutivo dai microbi agli esseri sociali e fino a quelli intelligenti, ha un tempo di generazione insolitamente rapido. I Neoterici si evolvono sempre più velocemente a mano a mano che il loro creatore li sottopone a prove sempre più drastiche. Infine, mentre stanno organizzando la rappresentazione per se stessi e comunicando con il loro inventore mediante un sistema che hanno progettato da soli, l'inventore li sottopone ancora a una prova finale, che essi superano. Quando, nella loro camera, sono introdotte tracce di ossido di alluminio e altri composti, quegli esseri in miniatura trasformano le molecole in pilastri solidi di metallo puro. Ciò impedisce alle pareti della gabbia che costituisce il loro habitat di serrarsi sempre più su di loro. Alla fine, i Neoterici si trovano isolati dal mondo esterno grazie a un materiale impenetrabile e sconosciuto. Perfino il loro inventore non riesce più ad avere contatti con loro.

Questo racconto offre una metafora per la situazione in cui si trova attualmente l'umanità. Tutti i crucci e le tribolazioni del processo evolutivo hanno stimolato la formazione di creature meravigliose e strane ciascuna – come abbiamo visto – più sorprendente dell'altra. La sfida naturale posta dalle glaciazioni che dovettero fronteggiare i nostri antenati, quei famosi antropomorfi tropicali, ha di recente affilato l'intelligenza nella forma umana. Ma quest'intelligenza, a quanto sembra giudicando dall'aumento apocalittico delle armi di distruzione in massa che si ha con il trascorrere del tempo, potrebbe, alla fine, risultare autolimitante. La produzione sempre più intensa di armi, che col tempo potrebbero uccidere gli stessi loro costruttori, è un evento molto comune nella storia della biosfera.

La natura accelerata dell'evoluzione, in generale, e dell'evoluzione culturale, in particolare, rende impossibile ogni previ-

sione per le innovazioni evolutive future, specialmente per quelle a lungo raggio. Se ci limitiamo a estrapolare le tendenze attuali, non arriviamo al futuro, ma a una caricatura del presente. Per esempio, quando fu inventato il telefono, si disse che, in un futuro non troppo lontano, ogni città e villaggio ne avrebbe avuto in dotazione uno. D'altra parte, quando furono inventati gli elicotteri, c'erano quelli che vedevano già il giorno in cui ogni casa suburbana ne avrebbe avuto uno nel suo eliporto. Scienziati di tutto rispetto, scrivendo su riviste convenzionali, e facendo riferimenti completi alla letteratura professionale e a equazioni matematiche, dissero che la superficie della Luna doveva essere ricoperta da strati contenenti petrolio sfruttabile commercialmente. Stabilirono anche che licheni in via di sviluppo, i quali diventavano verdi in estate, coprivano quasi interamente un emisfero del pianeta Marte. Altri scienziati previdero un tale spessore degli strati di polvere sulla superficie della Luna da ritenere impossibile ogni sbarco sul nostro satellite. Per questo, noi non pretendiamo di avere una conoscenza particolare, nostra, del futuro, ma discuteremo piuttosto delle possibilità che si basano su una consapevolezza del passato a lungo termine.

Al di là delle mode tecnologiche a breve termine, vi sono tendenze a lungo termine, riguardanti la vita (estinzione, espansione, simbiosi) e queste tendenze sembrano universali. Noi, come specie *Homo sapiens*, ci estingueremo, con o senza una guerra nucleare. Potremmo, come gli ittiosauri, le pteridosperme e gli australopitecini, non lasciare un erede negli annali della storia della Terra, oppure potremmo, come i coanomastigoti e *Homo erectus*, antenati rispettivamente delle spugne e dell'uomo moderno, evolverci in specie nuove distinte.

Tuttavia, indipendentemente da ciò in cui la nostra progenie si evolverà o a cui andrà incontro nel processo di devoluzione, se rimarrà sulla Terra, alla fine sarà bruciata viva. Con qualunque calcolo astronomico, risulta che il Sole ha una durata di vita di soli dieci miliardi di anni circa. Dopo aver bruciato come combustibile tutto il suo idrogeno primario, prenderanno il sopravvento le reazioni nucleari che spaccheranno gli atomi più pesanti, per esempio l'elio. Irradiando ed espandendosi

in una gigante rossa, la nostra stella morente brillerà come non ha mai brillato prima. Questo Sole luminoso genererà un calore immenso, facendo bollire ed evaporare gli oceani, distruggendo l'atmosfera e facendo fondere le rocce granitiche e basaltiche di superficie. Alla fine, si prevede che esaurirà il combustibile; negli ultimi stadi si contrarrà gravitazionalmente centinaia di volte, diventando una nana bianca densa e, alla fine, una nana nera, un minuscolo tizzone combusto nel vasto e infuocato universo.

Questa catastrofe nucleare naturale potrebbe essere la fine della nostra forma di vita sulla Terra, la prova finale senza soluzione alla quale saranno sottoposti quella portentosa molecola che è il DNA e noi esseri umani, se saremo ancora vivi, in qualunque forma, in quel momento? Tutta la nostra straordinaria evoluzione microcosmica verrebbe spazzata via nell'esplosione comune di una stella comune? Oppure vi è un'alternativa, vi sono basi scientifiche che possano, in estremo, alimentare una speranza?

Quando la Terra brucia e i suoi mari bollono fino ad evaporare completamente, per le ultime esplosioni di un Sole che muore, solo quella vita che si è spinta oltre la propria dimora planetaria (o che si è protetta in qualche modo) si salverà. Oggi, gli organismi che vivono nell'Antartide e nel Sahara sono le forme estreme di vita sulla Terra; sono comparsi perché esistono sulla Terra, vive e in ottima salute, le forme medie di vita, pingui, ricche d'acqua, organiche, illuminate dal Sole. I grattacieli americani e le metropolitane americane, per esempio, non sono generati in maniera indipendente, ma sono il risultato di una cultura di primati che lavora e che prospera, di una civiltà alimentata con i prodotti delle fattorie del Midwest e organizzata mediante collegamenti computerizzati da Los Angeles a New York. Solo dopo molto tempo e un duro lavoro creativo, *ogni* specie che sia potuta sopravvivere e si sia potuta riprodurre di fronte alle straordinarie differenze tra il proprio caldo, umido interno e il freddo, arido esterno, è riuscita a emergere. Il lettore ne è un esempio. Il suo interno è molto più simile alle coste tropicali dell'Archeano di quanto non sia alle zone temperate settentrionali, a cui la specie umana si è abil-

mente adattata grazie a un consono abbigliamento e a opportuni ripari. In effetti, con il riscaldamento a gasolio, i filodendri, le commelinacee, le docce sauna, l'ambiente effettivo dell'umanità è quello che è sempre stato: la boscaglia africana.

L'ambiente africano prototipo si è fatto strada dovunque, dalle sale per riunioni corporative di alto livello a Chicago, piene di fronzoli botanici, dracene, *Nephrolepis*, eccetera, agli interni degli igloo eschimesi, nel Canada nordoccidentale, dove bruciando grasso di foca e protetti da calde pellicce, i membri del corpo municipale si riuniscono con le stesse finalità. L'habitat di *Homo sapiens*, che è anche quello delle prime cellule, è stato spostato felicemente in mezzo all'Oceano Atlantico su lussuose navi da crociera. La progenie batterica delle primissime cellule è penetrata negli habitat umani e quindi ha perfino visitato la Luna. Dividendosi all'interno delle navicelle spaziali, delle tute e dei corpi degli astronauti americani, essa dà una vaga idea di come, in complesso, la vita debba rifarsi un ambiente per riuscire a sopravvivere nello spazio. Il trasferimento di un luogo paradisiaco in cui vivere è stato abilmente effettuato dalla nostra specie grazie alla capacità di estendere, mediante un'esperienza cumulativa della specie stessa, cioè mediante cultura, ciò che prima era solo trasmissibile attraverso il cambiamento genetico. Ma il risultato finale, estremamente ironico, di tutta la nostra intelligenza extragenetica è esattamente un'ulteriore conservazione dei geni. Al momento attuale, sembra che l'intelligenza sia un modo chiave per sopravvivere. Se la vita sulla Terra deve sopravvivere alla morte del Sole, deve portare le comunità microbiche in una dimora più sicura. Potrebbe il nostro lodevole ardimento autopoietico, responsabile di aver messo il DNA nell'orbita terrestre, essere esteso ancora più in là nello spazio?

Forse. Vi sono molti precedenti di trascendenza ambientale e, in fin dei conti, stiamo ancora giocando allo stesso vecchio gioco batterico. I batteri non si sono mai adattati alla Luna desolata, senz'aria, arida e terribilmente fredda, più di quanto noi non ci siamo adattati all'oscurità umida, fredda, rigida dell'inverno scandinavo. Piuttosto, noi e i batteri, di cui siamo costituiti per effetto dell'evoluzione, ci siamo dati da fare per

modificare questi ambienti disparati secondo le nostre esigenze. Contribuiamo a far muovere ritmicamente e a far dilatare i confini della vita sulla Terra. Non importa quanta energia sia necessaria o per portarci dietro l'ambiente ancestrale o per modificarlo o per crearne uno nuovo: lo facciamo. Portiamo gli habitat dei nostri predecessori nelle nostre dimore future. L'inserimento dei luoghi abitativi del passato in quelli nuovi è una forma intensa di conservatorismo, un rifiuto di cambiare profondamente radicato, o un compromesso per cui si cambia, sì, ma a condizione di farlo per rimanere allo stesso modo. Una simile monomania per la conservazione può essere esattamente ciò che serve per salvare i futuri organismi e con essi la vita stessa dalla distruzione che consegue all'esplosione del Sole. Il futuro può quindi avere in serbo per noi la metafora microcosmica finale: quella di un pianeta il cui destino ultimo sia "dividersi".

Abbiamo già alcuni indizi che i confini della vita si stiano dilatando. Popolazioni, industrie, università e zone suburbane si sono accresciute rapidamente, ma nessuna lo ha fatto per un tempo indeterminato senza provocare un grave esaurimento di risorse e una trasformazione dell'ambiente. La selezione naturale, che consiste praticamente in differenti velocità di riproduzione, nelle spirochete come nelle scimmie ateli, può essere spaventosa sotto il profilo emotivo. Le popolazioni sono oltre il bene e il male: esse si accrescono come risposta alla disponibilità di spazio, di cibo e d'acqua. Quando sono troppo numerosi, gli organismi o periscono o trascendono se stessi.

Se trascendono se stessi, essi trovano nuovi modi per procurarsi spazio, carbone, energia e acqua, il che produce nuove scorie. La produzione sempre più abbondante di nuovi rifiuti mette alla prova coloro che li producono. La vita stessa diventa una figura centrale, che crea i propri problemi e le rispettive soluzioni. Un esempio di un simile problema sarebbe l'inquinamento prodotto dall'uso di composti nel sistema solare esterno come parte di un programma, realizzato da corporazioni future, per acquisire risorse. Queste scorie tossiche potrebbero raggiungere la Terra. Su questa, la soluzione, come per il problema dell'ossigeno nel microcosmo primitivo, po-

trebbe essere la presenza di nuovi microrganismi in grado di tollerare o di fare uso di simili scorie. Ciò stabilirebbe, a sua volta, un'associazione vivente, su una distanza di milioni di chilometri, tra la Terra e le lune di Saturno.

Anche per riuscire ad afferrare in modo astratto le potenzialità della vita in futuro, dobbiamo accuratamente osservare come la vita si sia svolta in passato. La straordinaria evoluzione dell'uomo non può essere separata dalla coevoluzione dei microbi nostri antenati, i batteri che hanno costruito le nostre cellule e le cellule delle specie di piante e di animali di cui ci alimentiamo. Nella coevoluzione che si estende su un arco di tempo di migliaia di anni, gli organismi che risultano associati si modificano geneticamente. Le associazioni ereditarie si evolvono insieme quando compaiono nuove proteine e nuovi schemi di sviluppo. Infine, gli organismi associati diventano totalmente dipendenti l'uno dall'altro e non è più valido considerarli come individui. Il granturco, una graminacea d'importanza agricola, offre un sorprendente esempio di una simile coevoluzione, una coevoluzione svoltasi durante le ultime poche migliaia di anni, quindi in un periodo in cui già esisteva l'uomo. Il granturco non avvizzisce più totalmente, completando il suo ciclo in natura, come fanno le altre graminacee da cui si è evoluto: oggi il suo spesso cartoccio deve essere rimosso a ogni generazione dalle mani dell'uomo. La sua riproduzione è legata, quindi, alla nostra. Non può completare il suo ciclo vitale senza di noi perché è ormai parte di noi. Un tempo era il teosinte, una graminacea insignificante, autosufficiente, dell'altopiano messicano, che popolazioni affamate hanno selezionato e coltivato per ricavarne cariossidi sempre più grosse. È diventato così uno dei principali alimenti dell'umanità. L'abbondanza di ieri è diventata la necessità di oggi.

Il fantastico aumento della popolazione umana è dipeso dalle piante e probabilmente continuerà a dipendere da esse e dai loro cloroplasti di derivazione batterica, se dobbiamo portarci nello spazio. Erano necessari 1000 ettari nell'ultimo periodo interglaciale per mantenere un solo cacciatore del Paleolitico. È necessaria un'estensione 10000 volte inferiore oggi per mantenere un moderno coltivatore di riso giapponese. Così, per

Tabella 3

Accelerazione nella produzione di cibo

L'estensione del territorio necessario per dare sostentamento a una singola famiglia umana è diminuita in modo molto marcato dai costruttori di amigdale del Paleolitico, 35000 anni fa, ai coltivatori contemporanei giapponesi di riso. È questo un altro esempio di accelerazione evolutiva.

Tipo di cultura umana	*Area per il sostentamento di una singola famiglia*	*Tempo*
Cacciatori del Paleolitico	1000 ettari*	35000 anni fa
Popolazioni del Neolitico, che utilizzavano bovini da traino e aratri	10 ettari	8000 anni fa
Contadini medioevali	0,67 ettari	1000 anni fa
Coltivatori di riso indiani	0,20 ettari	100 anni fa
Coltivatori di riso giapponesi	0,064 ettari	oggi

* 1000 ettari equivalgono a 10 chilometri quadrati.

ogni cacciatore che errava, un tempo, per l'isola di Honshu, possono esistere oggi più di 10000 abitanti in un sobborgo di Tokyo (tabella 3). Come le cellule del microcosmo prima di noi, gli esseri umani devono coevolvere con le piante, gli animali e i microbi. Alla fine, probabilmente, ci aggregheremo in comunità compatte, che avranno il supporto della tecnologia e che saranno di gran lunga più saldamente organizzate delle famiglie piccole o grandi, o addirittura degli stati-nazioni, o dei governi e dei sudditi delle superpotenze. Germi poco evidenti del futuro supercosmo nello spazio, equivalenti al crossotterigio che dette origine a tutti i vertebrati terrestri, o al bizzarro sistema di sessualità meiotica che abbiamo ereditato da certi protisti, possono già essere presenti sulla Terra. I sistemi derivati da essi potrebbero includere varie forme di organizzazione politica, economica e tecnologica.

Gruppi di organismi formano nuove entità a livelli superiori di organizzazione. Società e popolazioni sono gruppi formati da membri della stessa specie; le comunità sono, invece, gruppi formati da membri di differenti specie (tabella 4). I simbionti, sotto certe pressioni, si comportano da singoli interi. Singoli batteri sono diventati gli organelli di cellule nucleate; cellule nucleate si sono riunite in "individui" pluricellulari,

Tabella 4

Prospetto gerarchico

Oggetti	*Unità di misura*	*Esempi*
atomi	angstrom	H, C, N, P
molecole	angstrom	H_2, NH_3, amminoacidi
macromolecole	angstrom	RNA, DNA, proteine
organelli	nanometri	nuclei, ribosomi
cellule	micrometri	batteri, cellule del sangue
tessuti	micrometri	cartilagine, epitelio
organi	millimetri	ovari, foglie
organismi	centimetri	esseri umani, margherite
popolazioni	metri	mandrie di bovini, sciami di locuste
comunità	metri	paludi salmastre, stagni
ecosistemi	chilometri	foreste, pianure costiere
bioma terrestre	migliaia di chilometri	somma di organismi
biosfera	migliaia di chilometri	superficie terrestre

Note:

Le *popolazioni* sono gruppi di individui, membri della stessa specie, che vivono negli stessi luoghi, nel medesimo tempo. Le *società* sono popolazioni, i cui membri si differenziano in base ai compiti specifici che svolgono.

Le *comunità* sono popolazioni di organismi di differenti specie, che vivono negli stessi luoghi, nel medesimo tempo.

Gli *ecosistemi* sono gruppi di comunità che si autosostengono (cioè i membri nutrono se stessi ed eliminano le proprie scorie; non è necessaria alcuna importazione o esportazione di materia per l'autopoiesi dei vari membri). Il più grande ecosistema noto è sicuramente la *biosfera*.

Il *bioma terrestre* è la somma di tutti gli animali e vegetali che vivono sulla Terra.

La *biosfera* è l'ambiente di dimensioni terrestri, che comprende tutta la flora e la fauna (bioma); essa si estende dalla sommità delle alte montagne agli abissi marini.

mille miliardi di volte più grossi di loro. Esseri ancora più grossi, i cui componenti sono a loro volta esseri viventi, sono stati chiamati "superorganismi".

Dato che la simbiosi è la regola nell'evoluzione e gli organismi sono sempre organizzati in comunità costituite da differenti specie, nessuna specie singola potrebbe mai effettuare da sola la transizione nello spazio. Sembra che gli esseri umani siano idonei a favorire la dispersione del bioma terrestre e che possano occupare un posto rilevante nel supercosmo, proprio come i mitocondri, utilizzando l'ossigeno all'interno delle cellule di piante e animali, hanno contribuito a fare insediare questi organismi sulla terraferma. Perché possano svolgere un

ruolo così importante nell'espansione della vita nello spazio, essi debbono imparare come fare dalle specie del microcosmo che hanno già avuto successo. Devono passare più rapidamente dall'antagonismo alla cooperazione e generalmente debbono trattare bene tutte le specie come fa il contadino con le galline da uova e le bovine da latte. Invece di cacciare di frodo gli animali rari per le pelli, o di esporre vistosamente sopra il camino teste munite di corna, o di sparare agli uccelli per sport, o di abbattere con i bulldozer gli alberi delle foreste pluviali tropicali, dovrà convivere con gli altri organismi. Dovrà formare gradatamente dei superorganismi. Questo è un comportamento equo. Contrariamente ai suoi antenati cacciatori, il piccolo contadino di oggi non ammazza una gallina o una vacca per un solo banchetto, ma ha cura dei suoi animali, di cui si limita a consumare le uova o il latte.

Questo cambiamento nel comportamento, dall'uccidere animali che fanno parte del suo ambiente per nutrirsene all'aiutarli a vivere bene, mangiandone solo le parti di cui essi possono fare a meno, è un segno di maturità della specie. È per questo che l'agricoltura, in cui si mangiano ortaggi e granaglie, ma si conservano sempre i semi, appare come una strategia più efficace della semplice raccolta di piante. Il passaggio dall'ingorda ghiottoneria, dalla soddisfazione del momento, al mutualismo a lungo termine, è stato compiuto molte volte nel microcosmo. In effetti, non richiede neppure preveggenza o intelligenza per farlo: i distruttori brutali finiscono sempre per distruggere se stessi, lasciando automaticamente a coloro che se la cavano meglio con gli altri l'eredità del mondo vivente.

Gli antenati dei mitocondri presenti nelle nostre cellule erano probabilmente batteri dannosi che invadevano la preda, uccidendola. Ma noi siamo esempi viventi che queste tattiche distruttive non funzionano sulla lunga distanza: i mitocondri abitano pacificamente nelle nostre cellule, fornendoci energia in cambio di un posto dove poter vivere. Mentre le specie dannose possono venire e andare, la cooperazione vera e propria aumenta con il trascorrere del tempo. L'uomo può espandersi, saccheggiando e distruggendo l'Amazzonia, ignorando tutto della biosfera, ma la storia delle cellule ci insegna che così non

durerà a lungo. Per riuscire a sopravvivere per almeno una piccola frazione del tempo in cui sono sopravvissuti i simbionti batterici, colonizzatori di mari e terraferma, l'uomo dovrà cambiare. Indipendentemente dal fatto che andiamo o no nello spazio, dovremo smorzare i nostri istinti aggressivi, limitare la nostra crescita rapace e diventare di gran lunga più concilianti con il resto della biosfera, se vorremo sopravvivere sulla lunga distanza.

Pur sapendo da dove proveniamo, la visione di dove andiamo diventa confusa quanto più la osserviamo. Ma, come scrisse William Blake, il poeta visionario, «Ciò che oggi viene dimostrato vero, in passato era soltanto *immaginato*». Si possono immaginare molti modi in cui l'uomo potrebbe evolversi in una specie distinta da *Homo sapiens*. Il modo più semplice non sarebbe affatto per mutazione, ma per ricombinazione sessuale di geni preesistenti. Benché tutti gli esseri umani appartengano alla stessa specie, nella popolazione umana si possono notare degli estremi. Per esempio, una donna pigmea può non essere in grado di dare un figlio a un watusso, avendo un bacino troppo piccolo. Questo esempio mostra quale varietà naturale sia presente in qualunque specie che, con il passare del tempo, potrà dare origine a specie divergenti, incapaci di ibridarsi a causa di cambiamenti esteriori, conseguenti a un'alterazione dei simbionti, del comportamento, dei mitocondri, dei cromosomi o delle sequenze nucleotidiche del DNA.

Ma oggi le cellule possono essere fuse in una fecondazione forzata e si può escogitare un accumulo di grandi quantità di cambiamenti nelle coppie di basi del DNA. Gli "atti" dei futuri biotecnologi potranno essere, in definitiva, nuovi organismi. L'impiego di insiemi di geni batterici è già diventato un luogo comune, o perlomeno lo sono diventate le basi per un simile impiego. Per mezzo della biotecnologia, quei segmenti di DNA che si chiamano plasmidi sono inseriti nei batteri e, pertanto, rapidamente replicati. Geni che codificano per le proteine, anche proteine umane, possono essere replicati associandoli ai plasmidi. I feromoni, afrodisiaci che modulano la sessualità, o gli ormoni ipofisari, sostanze che controllano i processi di ac-

crescimento, possono essere sintetizzati dai batteri e successivamente inseriti nel nostro organismo, o nelle piante e negli animali che fanno parte del nostro ambiente. Con il know-how tecnologico, interi insiemi di geni, proteine, ormoni e altre sostanze sono congiunti, creando nuove specie di microbi. Sono stati concessi brevetti a coloro che sostenevano di aver prodotto in laboratorio nuovi ceppi di organismi viventi. Una conoscenza dell'embriologia e dei sistemi immunitari contribuirà a permettere la clonazione di cellule in organismi più grossi e più complessi. Nuove specie di organismi, come pure i mitici mostri del folclore, potrebbero essere prodotte da esperti di ingegneria genetica per puro divertimento oppure per essere asservite. Le industrie faustiane del futuro probabilmente ci sommergeranno con la loro capacità di fabbricare forme di vita utili su misura.

La questione dell'intervento diretto nei processi dell'evoluzione umana è affascinante. Essa viene affrontata oggi da diversi fronti separati: la selezione naturale tradizionale (diboscamento, miglioramento genetico animale e vegetale), la biotecnologia, l'informatica e la robotica. Dato che l'evoluzione accelera di continuo, sarà soltanto una questione di tempo perché questi vari metodi possano giungere a un punto di convergenza. Geologicamente parlando, ci riferiamo a periodi di tempo eccezionalmente brevi, nell'ambito probabilmente delle nostre stesse esistenze.

Nella storia della tecnologia, la scienza dei calcolatori è stata uno dei campi che si sono accresciuti con maggiore rapidità. Dai tubi a vuoto ai transistor e ai semiconduttori, in soli pochi decenni gli elementi dei calcolatori che elaborano l'informazione si sono miniaturizzati riducendosi di decine di migliaia di volte. La loro velocità di commutazione, il tempo necessario per passare da "on" a "off" in un codice binario, è salita da venti a un miliardo di volte al secondo. Programmi psichiatrici dispensati da dietro un tramezzo hanno ingannato i pazienti facendo loro credere di comunicare con esseri umani.

Le macchine intelligenti aiutano già a proiettare le molecole di nuovi farmaci. I calcolatori trasferiscono già in modo efficiente somme di danaro e tengono enormi quantità di dati in memorie che sono di gran lunga più ampie di quella di qualsia-

si essere umano. Negli uffici e nelle case, essi hanno già cominciato a sostituire gli scritti su carta con nastri e dischi magnetici. Guardiamo già ai servizi d'informazione pubblici collegati con archivi domestici, schermi televisivi, telefoni e stampanti. L'accesso all'informazione su scala mondiale può decentralizzare il potere e demistificare la conoscenza professionale. Questa rivoluzione nel campo dell'informazione può portare addirittura a una nuova epoca di gestione democratica del potere, ma può anche frammentare la società, dividerla in case elettroniche isolate e incoraggiare nuove forme di sfruttamento politico e di crimine.

Quando documenti, libri e altri congegni computerizzati diventeranno un luogo comune, dato lo scarso costo dei componenti silicei miniaturizzati dei calcolatori, la società subirà una trasformazione. Il danaro diventerà sempre più elettronico e questa tendenza proseguirà. L'istruzione diventerà più semplice con l'entrata in commercio di nuovi mezzi d'insegnamento. Oltre all'"ufficio senza carta", vi sarà quello che Christopher Evans, un esperto di computer, ha chiamato "la morte del mondo della carta stampata".[40] I libri stampati tradizionali diventeranno per gli uomini del futuro oggetti altrettanto insoliti e rari, oltre che costosi, quanto le prime edizioni o i vecchi manoscritti appaiono a noi. I libri di testo e i libri in brossura commerciali appariranno come iniziative estremamente laboriose. Ogni massa ingombrante di carta inchiostrata, come quella che state tenendo in mano ora, assumerà l'aspetto antiquato, tanto per fare un esempio, della Bibbia di Mainz di Johann Gutenberg. Dato che la natura complessa delle società future dovrà dipendere ed essere controllata da macchine intelligenti, i movimenti sociali, le transazioni finanziarie e le scoperte esplorative saranno tutti registrati in memorie artificiali. Poiché il ricupero di eventi immagazzinati nel calcolatore sarà molto più fedele delle ricostruzioni cinematografiche o dei romanzi storici, sarà possibile rivivere la storia ed esplorare il passato. Attraverso la tecnologia, l'antica capacità della vita di conservare il passato nel presente, la sua fedeltà mnemonica, migliorerà di molto. Questo fenomeno della memoria, favorito dal cinema, dalla storia scritta, dalle registrazioni elet-

tromagnetiche e da altre tecnologie informatiche, è ancora in fase di accelerazione.

Dato che i chip di silicio con migliaia di bit di memoria possono oggi passare attraverso la cruna di un ago, i microprocessori (minuscoli calcolatori) sono sufficientemente leggeri da poter essere inseriti in macchine, trasformate così in robot. I robot hanno notevoli potenzialità per il futuro. Nel 1976, il robot del veicolo spaziale Viking eseguì un compito che nessun essere umano sarebbe stato in grado di eseguire. Scendendo sulla superficie del pianeta rosso, bombardata da radiazioni ultraviolette, gelida e soffocante, allungò il suo braccio meccanico, raccolse un campione in profondità e analizzò l'arido e ossidato sottosuolo marziano. Altri robot sono più "terreni" ed economici. Robot metallici con molte braccia fissano i pneumatici alle automobili con un tasso di produttività di gran lunga superiore alle loro controparti umane. La stessa catena di montaggio viene oggi assemblata. In Giappone, robot costruiscono parti per altri robot. Robot sempre più simili a organismi viventi vengono realizzati con crescente facilità dato che le industrie automatizzate svolgono un ruolo via via più importante nell'economia globale.

Come i computer e le macchine vengono a trovarsi riuniti nel nuovo campo della robotica, così la robotica e il mondo dei batteri potranno alla fine ritrovarsi fianco a fianco nei cosiddetti "biochip", non fatti di silicio, ma di composti organici complessi. In pratica, un computer organico. Come piante che effettuano la fotosintesi, queste molecole artificiali scambierebbero energia con l'ambiente circostante. Ma, invece di trasformarla in materia cellulare, la trasformerebbero in informazione. Le possibilità inerenti a un simile sviluppo sono tremende. Questi computer "viventi" potrebbero trattare milioni di atomi di idrogeno al secondo e, forse, essere integrati in organismi coscienti. A questa distanza nel futuro, l'immaginazione viene sopraffatta. Le conseguenze di questo scambio d'informazione tra tecnologie dei computer, robotiche e biologiche non sono prevedibili. Forse solo le previsioni più stravaganti hanno una qualche probabilità di risultare vere.

Quali saranno gli stravaganti destini di *Homo sapiens* nei prossimi duecento anni? Esaminiamo alcuni dei molti possibili futuri, condizionati dalle attività biologiche. Come abbiamo visto, le cellule nucleate di tutti gli animali, funghi e piante contengono geni allineati su cromosomi. È noto che le specie si evolvono con mezzi diversi, tra cui le traslocazioni cromosomiche, l'accumulo di mutazioni nel DNA e la simbiosi. I cromosomi che subiscono, nella loro struttura, cambiamenti ereditabili provocano salti evolutivi ben più ampi di quelli causati da mutazioni a carico di coppie di basi nucleotidiche. Salti evolutivi dovuti a simbiosi, come quelli delle amebe di Jeon, possono produrre nuove specie nell'arco di poche generazioni. Nulla impedisce a queste modalità di variazione di operare su popolazioni umane. E difatti alla fine alcuni dei nostri discendenti saranno destinati a subire mutazioni cromosomiche o ad acquisire nuovi simbionti.

Per cominciare, immaginiamo alcuni mutanti cromosomici, cioè esseri umani con più delle due serie di cromosomi standard. Questi esseri poliploidi sarebbero analoghi al cotone, al frumento e a piante dai fiori vistosi, come il garofano. Le varietà di queste piante che si trovano in commercio sono tutte poliploidi. Pertanto, anche gli esseri umani poliploidi sarebbero probabilmente più grossi e più vistosi dei loro affini diploidi. Potrebbero così essere più adatti a vivere in condizioni di bassa forza di gravità.

Nella maggior parte dei casi, i mammiferi poliploidi, quelli con serie supplementari di cromosomi, non sopravvivono. Eppure sappiamo che improvvisi cambiamenti a carico dei cromosomi, come quelli interessati nella scissione del cariotipo, hanno dato origine a molte nuove specie di mammiferi. La scissione cariotipica è il nome dato a un processo in cui i cromosomi si dividono a livello dei cinetocori. Molte specie di mammiferi del Cenozoico, confrontate con i loro antenati, mostrano mezzi cromosomi, rotti proprio a livello dei cinetocori. Neil Todd, direttore di "Carnivore Genetics Newsletter", ritiene che la scissione cariotipica sia interessata nell'evoluzione dei cani dai lupi, dei maiali dai cinghiali e perfino delle scimmie antropomorfe più simili all'uomo dalle scimmie.

Combinata con l'incesto, essa potrebbe portare in teoria a nuove specie umane, forse addirittura con un'accelerazione evolutiva. I conquistatori del supercosmo, se saranno nostri discendenti, o perlomeno i discendenti di qualcuno di noi, avranno probabilmente cromosomi ancora più scissi di quanti ne abbiamo noi.

Gli esseri umani futuri potranno poi essere addirittura verdi, come conseguenza di una simbiosi. Esempio di una simile specie di esseri umani prodotti simbioticamente è *Homo photosyntheticus*, il rimedio immaginario al problema dell'eroina suggerito dall'esperto di alghe Ryan Drum. Gli *Homo photosyntheticus* sono eroinomani o cocainomani verdi, le cui teste sono state rasate e nei cui scalpi sono state inoculate alghe in strato sottile. In fila sotto la luce, questi ominidi verdi non dovrebbero essere tossicomani, ma Drum suggerisce che, anche se lo fossero, alimentandosi con le loro risorse interne, non sarebbero di peso alla società.

L'evoluzione è già stata testimone di alleanze nutritive tra organismi affamati e batteri o alghe, illuminati dal Sole e autosufficienti. *Mastigias*, un medusoide dell'Oceano Pacifico, un pacifico celenterato simile a *Physalia*, il vascello portoghese, favorisce i suoi partner fotosintetizzanti, nuotando verso le zone dove la luce è più intensa. Per contro, i partner lo nutrono bene. Lo stesso potrebbe accadere a *Homo photosyntheticus*, una specie di vegetariano in extremis, che non mangia più, ma vive del cibo prodotto nel suo interno dalle alghe, localizzate nel suo scalpo. Con il tempo, i suoi discendenti potrebbero tendere addirittura a perdere la bocca. Un analogo destino evolutivo lo ha avuto realmente il protista *Mesodinium rubrum*, che causa le maree rosse. Questo ciliato ha una bocca vestigiale, che non gli serve più per l'alimentazione: esso, infatti, è nutrito a sufficienza dalle popolazioni interne di alghe simbionti. Inoltre, proprio come la cute di *Homo photosyntheticus* tenderebbe a diventare glabra e chiara per lasciar arrivare alle alghe una sufficiente quantità di luce, *Mesodinium rubrum* appare di gran lunga più trasparente dei membri di specie affini, appartenenti allo stesso genere. *Mesodinium rubrum*, inoltre, nuota lentamente all'indietro, crogiolandosi al-

la luce del Sole. Allo stesso modo, *Homo photosyntheticus* potrebbe essere trasparente, un poco pigro e sedentario.

Platelminti trasparenti, appartenenti alla specie *Convoluta roscoffensis*, contengono alghe verdi tra le cellule dei loro tessuti. Sulle spiagge della Bretagna e lungo la Manica vengono generalmente considerati alghe verdi. Di colore verde intenso, sono in realtà "animali-piante". Gli adulti possiedono bocche chiuse non funzionanti. Le alghe non solo vivono sotto la loro cute trasparente, nutrendoli, ma riciclano anche le scorie, che sono sotto forma di acido urico. Utilizzano per se stesse una parte della molecola di acido urico (quella contenente carbonio e ossigeno) e trasformano il resto in ulteriore cibo per il verme.

In modo analogo, alla fine, le alghe simbionti di *Homo photosyntheticus* potrebbero aprirsi un varco verso le cellule germinali. Invaderebbero innanzitutto i testicoli e da qui entrerebbero nelle cellule spermatiche nel momento in cui queste vengono prodotte. (Questo fatto non è incredibile: è noto che simbionti batterici degli insetti fanno esattamente lo stesso. Alcuni penetrano nelle cellule spermatiche; altri sono trasmessi alla generazione successiva attraverso le uova.) Le alghe, associate agli spermatozoi durante l'accoppiamento e penetrando forse anche nelle cellule uovo, alla stregua di una malattia venerea benigna, potrebbero assicurarsi la sopravvivenza nei caldi e umidi tessuti umani.

Negli ultimi stadi di questo scenario che ha del soprannaturale, immaginiamo gruppi di *Homo photosyntheticus*, che poltriscono in masse compatte sulle spiagge orbitanti del futuro, giocherellando pigramente con le alghe marine e con le conchiglie rotte dei molluschi.

Abbiamo suggerito tre possibili vie per l'evoluzione umana. Esse sono forse fantasiose, ma le lezioni del passato ci insegnano che cambiamenti del genere sono inevitabili. I particolari possono anche essere assurdi, ma il cambiamento è certo. Possiamo pensare ad altre peculiari eventualità. Una è la "ciber-simbiosi", evoluzione di parti di esseri umani in forme di vita future. In questo scenario, gli esseri umani hanno un'importanza per lo sviluppo del supercosmo altrettanto fondamentale

di quella dei mitocondri o delle spirochete per il macrocosmo. Se trascendiamo il destino che porta i mammiferi a estinguersi e sopravviviamo in una forma alterata, possiamo perseverare non come "individui", ma come vestigia. Possiamo immaginarci come analoghi delle vestigia delle spirochete: future forme umane ridotte, dotate di protesi (forse avremo solo sistemi nervosi delicatamente dissezionati, attaccati a braccia di plastica fatte muovere elettronicamente), che impegnano il potere decisionale nelle funzioni di mantenimento del veicolo spaziale che si riproduce.

Sfortunatamente per coloro che ritengono che l'umanità sia l'apoteosi, il culmine della vita sulla Terra, l'idea di macchine che si riproducono non è una fantasia scientifica, ma una questione di fatto nell'attuale organizzazione della biosfera. Produzione, riproduzione e automantenimento, o autopoiesi, sono termini relativi. Se pensiamo che la riproduzione sia il carattere più saliente della vita e la biosfera l'unità fondamentale, allora neppure la Terra può essere considerata vivente, poiché non si è ancora riprodotta. In verità, solo il DNA e l'RNA si possono riprodurre direttamente. Ogni altra cosa (batteri, fanciulle, balene, salici piangenti, McDonald, e veicoli spaziali NASA) si riproduce indirettamente attraverso queste molecole. Una grande quantità di duplicazioni molecolari, crescite cellulari, sviluppi e attività costruttive viene chiamata in causa prima che due batteri, due fanciulle, due balene, due salici piangenti, due McDonald, e due veicoli spaziali NASA compaiano nella biosfera.

Samuel Butler ha scritto che l'idea darwiniana degli "organi rudimentali" potrebbe essere applicata anche ai manufatti umani come le pipe e i capi d'abbigliamento. La sopravvivenza di stravaganze arcaiche nell'abbigliamento vorrebbe dire anche bottoni supplementari nella camicia, tasche finte e asole delle bretelle puramente decorative. Butler si è anche chiesto se la piccola protuberanza in fondo al fornello della sua pipa potesse essere derivata dal vecchio tipo di pipa, non portatile, in cui la protuberanza, come il bordo rilevato che si trova sul fondo di una tazza da tè, serviva per «evitare che il calore del-

la pipa rovinasse il piano del tavolo su cui la pipa veniva appoggiata». Per Butler questi organi rudimentali mostravano che gli organismi, come i manufatti meccanici, erano, se non progettati, perlomeno modellati in modo più creativo di quanto potessero spiegare le teorie darwiniane. Butler concentrò anche l'attenzione sull'idea di sviluppo della macchina, per mettere in satira il cieco entusiasmo con cui i suoi concittadini avevano salutato la Rivoluzione industriale.

Tutto ciò si riflette nella lettera dal titolo "Darwin Among the Machines" (Darwin tra le macchine), che, nel 1863, Butler inviò a "The Press", un giornale pubblicato a Christchurch, in Nuova Zelanda. In questo commento faceto, scritto quattro anni dopo la pubblicazione dell'importantissimo trattato di Darwin, *Sull'origine delle specie*, Butler confrontava l'abilità adattativa della "vita meccanica" con quella dei semplici mortali in carne e ossa. «Vi sono ben poche cose», esordiva, «di cui l'attuale generazione possa essere fiera al di là degli straordinari sviluppi che, di giorno in giorno, hanno luogo in ogni tipo di applicazione meccanica.» Ma che cosa accadrebbe, egli si chiedeva, se la tecnologia continuasse a evolversi in modo tanto più rapido dei «regni animale e vegetale»? Ci sostituirebbe, forse, «nella supremazia sulla Terra»? Proprio come «il regno vegetale si sviluppò lentamente da quello minerale», Butler spiegava, «e, in un modo analogo, l'animale sopraggiunse dopo il vegetale, così ora, in quest'ultimissimo periodo, è spuntato un regno interamente nuovo, di cui noi, finora, abbiamo visto soltanto quelli che un giorno saranno considerati i prototipi antidiluviani della razza».

Butler riconosceva però che le macchine erano ancora controllate da chi le produceva, ma, contemplando le meraviglie della tecnologia del XIX secolo, egli si chiedeva se questo sarebbe accaduto sempre in futuro: «Noi stiamo dando loro ogni giorno più potere e le stiamo fornendo di ogni tipo di congegni ingegnosi, i quali, autoregolandosi e agendo autonomamente, alimentano ciò che sarà per le macchine ciò che l'intelletto è stato per la razza umana». Le macchine erano, infatti, già più efficienti nel trasformare in energia per lavoro le materie prime e, in generale, richiedevano per il mantenimento

meno degli animali da lavoro. Dovrà passare ancora molto tempo prima che esse possano essere attrezzate con organi riproduttivi? «Non c'è nulla che la nostra razza infatuata desidererebbe di più», commentava celiando, «che vedere un'unione feconda tra due macchine a vapore.»

Oggi, naturalmente, la capacità delle macchine e la loro interdipendenza con gli esseri umani sono di gran lunga superiori a quanto lo fossero ai tempi di Butler. Nel 1961, Norbert Wiener, il fondatore della cibernetica, scrisse che «non vi è nulla di nuovo nell'idea di congegni non umani dotati di notevole potere e di grande abilità nel perseguire una linea di condotta, e dei pericoli connessi con tutto ciò. Ciò che è nuovo è che effettivamente possediamo oggi dispositivi efficienti di questo tipo. In passato, possibilità analoghe sono state postulate per tecniche riguardanti la magia, attorno a cui si snodano così tante leggende e racconti popolari».[41] Dal punto di vista della biosfera, simili congegni sono una soltanto delle più recenti strategie messe in atto dal microcosmo per estendere il proprio dominio, oltre l'attuale scala, nel futuro supercosmo. La classificazione delle macchine come non viventi non nega il fatto che esse si riproducano, e si riproducano con cambiamenti, in maniera altrettanto rampante di quanto facciano i virus.

Attrezzi agricoli con proprietà che ricordano i virus (per esempio i trattori o le mietitrici) servono a rifornire l'umanità di cibo e ciò porta a un ulteriore aumento della popolazione umana. Tra questa popolazione in continuo sviluppo vi sono coloro che sono impegnati nell'agricoltura e che progettano, perfezionano, costruiscono e vendono più trattori e mietitrici e altri dispositivi per incrementare la produzione di cibo. Aumentando il numero delle piante di granturco e degli esseri umani, i trattori hanno la loro riproduzione assicurata. Essi sono autocatalitici. In verità, il potenziale delle macchine per la crescita esponenziale, cioè il tipo di accelerazione evolutiva che abbiamo notato prima, supera di gran lunga quello dei corpi degli esseri umani. Per esempio, la World Future Society di Bethesda, nel Maryland, ha riportato che la crescita percentuale annua per la popolazione di robot negli USA è stata del

30% nel 1984. Durante lo stesso periodo, la crescita percentuale annua della popolazione statunitense è stata appena inferiore al 2%.

Ci piace etichettare le popolazioni di mammiferi recenti, numerose, adattative, in espansione (in breve, popolazioni di tipo umano) con la locuzione "progredite sotto il profilo evolutivo". Perfino gli scienziati tendono a chiamare "superiori" gli organismi che combinano le grandi dimensioni, i tassi di riproduzione rampanti, i cambiamenti rapidi e una comparsa recente sulla scena evolutiva. Stiamo sostenendo qui che, secondo questo cumulo di criteri, le macchine sono, da un punto di vista evolutivo, ancora più "progredite" di noi. Modificano la loro forma a una velocità di gran lunga superiore a quella di qualsiasi animale; ne sono testimoni le automobili, il telefono, le fotocopiatrici o i personal computer. Sono, inoltre, in grado di sopravvivere in ambienti dalle caratteristiche estreme, più di quanto non facciano l'uomo e gli altri animali, dotati di sistema nervoso centrale. Il loro tempo di generazione può essere di gran lunga più breve di quello degli esseri umani. Superano l'uomo in attività informatiche, come la matematica e la stampa. Hanno, infine, a loro disposizione una quantità maggiore di energia meccanica, compresa quella che proviene dalla fusione nucleare, dalla combustione e dalla fotoelettricità.

Il fatto che le macchine dipendano chiaramente da noi per quanto riguarda la costruzione e il mantenimento non sembra essere un argomento serio contro il fatto che siano vive. Anche noi dipendiamo dai nostri organelli, per esempio dai mitocondri e dai cromosomi, per la nostra esistenza, eppure nessuno sosterrebbe mai che non siamo realmente viventi. Siamo forse semplicemente dei contenitori per organelli? In futuro, gli esseri umani potranno progettare macchine che programmino e riproducano se stesse in modo più indipendente dagli esseri umani. Norbert Wiener riteneva che la riduzione di sistemi oscillanti a una data frequenza da parte di altri sistemi oscillanti a una differente frequenza verso una frequenza comune costituisse una stimolante frontiera di incipienti processi riproduttivi elettrici. La nota più ricca di speranza per la sopravvivenza umana potrebbe essere il fatto che oggi siamo altrettan-

to necessari per la riproduzione delle nostre macchine di quanto i mitocondri lo sono per la nostra riproduzione. Ma, poiché le forze economiche premeranno per migliorare le macchine sotto ogni aspetto, compresa la loro produzione con un minimo di manodopera, nessuno può dire quanto durerà questa nota di speranza. John von Neumann, colui al quale va il merito di aver progettato il calcolatore, affermava in modo inequivocabile che si potrebbero costruire macchine sufficientemente complesse da riprodurre se stesse in assenza di intervento umano.

Un altro serio argomento contro l'idea che le macchine siano vive è che esse sono prive di DNA e RNA e non sono costituite da composti del carbonio e dell'azoto in acqua. Ma anche gli alveari, il fosfato di calcio delle ossa e l'esoscheletro degli insetti sono privi di DNA e RNA. Durante il processo di dissezione analitica, l'organizzazione vivente scompare. Il dibattito su che cosa sia e che cosa non sia vivente assume un nuovo fascino quando uno studio approfondito delle trasformazioni prodotte sull'ambiente dalle sostanze di rifiuto e da un'atmosfera impregnata di sostanze chimiche prodotte dagli organismi viventi rivela che non si può tracciare una linea netta tra quegli organismi e il loro ambiente, tra ciò che è naturale e ciò che non lo è. Se la vita viene definita come entità basate sui composti ridotti del carbonio e in grado di riprodursi per autopoiesi, allora a prima vista le macchine di von Neumann, che pur si riproducono autonomamente, non potranno mai essere considerate vive perché non sono basate sul carbonio. Ma che cosa significa "basate"? Sicuramente, qualunque invenzione degli esseri umani si basa su una varietà di processi, incluso quello della replicazione del DNA, indipendentemente dalla separazione nello spazio o nel tempo di quella replicazione da quell'invenzione. Non si tratta di sofismi, un'indefinitezza di minuziose distinzioni, o di riduzionismo scientifico, ma piuttosto di ciò che potrebbe essere definito una "realtà postanalitica".

Semplicemente estrapolando i tipi di biosfera, possiamo predire che gli esseri umani sopravviveranno, in modo niente affatto riconoscibile, come sistemi di supporto connessi a quelle

forme di organizzazione vivente che hanno il massimo potenziale di percezione e di espansione, in pratica le macchine. I discendenti di *Prochloron*, i cloroplasti, hanno conservato una velocità di crescita molto superiore all'interno delle cellule vegetali rispetto ai *Prochloron*, i batteri verdi, loro affini, che sono distribuiti a chiazze nell'Oceano Pacifico. Analogamente, gli esseri umani associati alle macchine hanno già un notevole vantaggio selettivo su quelli che si sono allontanati dalle macchine.

L'evoluzione futura del supercosmo può essere paragonata all'evoluzione di cellule nucleate da comunità di batteri nel microcosmo, cellule coevolutesi più di un miliardo di anni or sono. La vita può continuare a espandersi tramite questo percorso: DNA-esseri umani-entità basate sulle macchine ("tecnobiche"). Dato il fenomeno dell'accelerazione evolutiva, delucidato da John R. Platt, essa può, in periodi di tempo incredibilmente brevi, penetrare in vaste regioni della Galassia. In relazione a precedenti progressi evolutivi (la conquista della terraferma e il volo alato nell'atmosfera), la colonizzazione della Galassia potrebbe essere avvenuta quasi istantaneamente. Forse nei prossimi secoli, l'universo sarà pieno di vita intelligente (filosofi al silicio e computer planetari, i cui grossolani antenati stanno evolvendo proprio ora in mezzo a noi). Da una prospettiva a lunga distanza, la nostra posizione di fronte al futuro non tende verso uno sciovinismo umano. Fossili di macchine in tracce esistono già nel sistema solare oltre la Terra. Dal 1976 fino a che, agli inizi degli anni Ottanta, venne tagliata ogni loro connessione con la Terra, essendo state ridotte le sovvenzioni della NASA, i satelliti Viking in orbita e da atterraggio esaminarono periodicamente la solitaria tranquillità del paesaggio di Marte. Altre macchine, che rappresentano estensioni della biosfera e che si presentano sotto forma di veicoli spaziali orbitanti attorno a diversi corpi celesti, in primo luogo la Terra, sono ancora "vivi". Sono collegati al sistema e, di fatto, sono meno vulnerabili ai rischi che provengono dall'esterno di quanto non siano gli esseri in carne e ossa.

Estendendo il corso della vita, che può essere decifrato leggendo l'antica storia della vita così come è registrata nelle roc-

ce, in un futuro geologico a brevissimo termine, possiamo dire che le estinzioni e le sostituzioni dei mammiferi, inclusa la nostra, continueranno. Così come continuerà la comparsa di nuove forme di vita sia meccaniche sia organiche. Presto le prime potranno anche superare le seconde, e la tecnologia, catalizzata da future crisi, potrà risultare altrettanto importante per il prossimo ciclo di innovazioni evolutive quanto i cloni di cellule nucleate lo furono per l'affermarsi della tecnologia. Dato l'alto livello di accelerazione che esiste nella trasformazione attuale, potremo forse, nei prossimi decenni, vedere indizi di tali rinnovamenti globali nella struttura fondamentale della vita.

In uno dei commenti inviati al direttore di "The Press", Butler scrisse: «Trattiamo i cavalli, i cani, i bovini e gli ovini, nel complesso, con grande gentilezza, diamo loro qualunque cosa l'esperienza ci insegna che sia il meglio per loro, e non può esservi alcun dubbio che il nostro uso di carne abbia accresciuto la felicità degli animali inferiori molto più di quanto gliene abbia sottratta; in maniera analoga, è ragionevole supporre che le macchine avranno dei riguardi verso di noi, dato che la loro esistenza dipende dalla nostra quanto la nostra dipende da quella degli animali inferiori.» «L'uomo» egli aggiungeva per consolare, «continuerà a esistere, anzi addirittura a migliorare, e probabilmente starà meglio in uno stato di addomesticamento sotto il controllo benefico delle macchine di quanto non stia oggi allo stato selvaggio.» Samuel Butler stava scherzando, per mostrare l'assurdità di una visione puramente meccanica della vita. Ma anch'egli avrebbe potuto essere un visionario, che vedeva un aspetto importante del futuro supercosmo: l'impiego di tutti i congegni tecnologici nel trasportare l'umido caldo ambiente del microcosmo pre-fanerozoico in un futuro non umano altrettanto incantevole del passato non umano.

Di tanto in tanto sentiamo ancora gli scienziati e la stampa esprimere timori sul fatto che, con le nostre sonde lanciate nello spazio, potremmo infettare gli altri pianeti con microbi provenienti dalla Terra. Ma ciò accadrebbe se gli esseri umani do-

vessero vivere nello spazio per periodi di tempo prolungati. Per vivere economicamente nelle stazioni spaziali, o sulla Luna, o su Marte, od oltre, gli esseri umani dovrebbero importarvi la biotecnologia del microcosmo. Naturalmente ciò non vuol dire semplicemente infettare i pianeti; vuol dire "fertilizzarli", inoculando in essi i giusti tipi e le giuste quantità di microbi, così che possa svilupparsi un habitat che dia loro sostegno. La malattia spesso riflette una crescita eccessiva, opportunistica, di microbi, normalmente presenti nell'ambiente; in effetti, la morte di questi microbi non guarirebbe, ma acuirebbe la malattia, dato che alcuni di essi, pur patogeni, svolgono il salutare compito di limitare altri microbi. Per esempio, i bacilli gram-negativi, normali ospiti intestinali che, cionondimeno, possono scatenare la polmonite in neonati suscettibili, possono essere contrastati nel loro sviluppo dall'introduzione di certi ceppi di streptococchi. La salute degli ecosistemi è paragonabile alla nostra salute: dipende dalle popolazioni di differenti organismi, dal metabolismo, dalla crescita e dalla coevoluzione dei vari biomi associati. L'idea che le stazioni spaziali possano essere trasformate in paradisi terrestri in grado di automantenersi e dove manchino comunità microbiche è semplicemente ridicola. Queste stazioni sarebbero sterili "barattoli di latta" nello spazio.

Studi preliminari, condotti all'Ames Research Center della NASA a Moffett Field, in California, mostrano l'importanza della complessità biologica nella creazione di sistemi viventi stabili. Esperimenti effettuati sui microbi chiusi in contenitori di plastica e posti alla luce suggeriscono che una maggiore quantità di specie (in altre parole una maggiore complessità) tende a potenziare la stabilità e la produzione fotosintetica di alimenti. Anche se i nostri discendenti, meglio adattati di noi, avranno la possibilità di creare il supercosmo, le enormi quantità di esseri umani interagenti in comunità rigidamente organizzate potranno richiedere milioni di anni per produrre ecosistemi stabili, in grado di dare sostegno alla vita al di fuori della Terra. Noi probabilmente non possiamo infettare per negligenza i pianeti, anche se tentassimo di farlo; i microbi devono essere inoculati. Per seminare il supercosmo sembrerebbe ne-

cessaria una rara combinazione di giocosità scientifica, di spirito pionieristico e di "pollice verde" microbico.

Anche se la sua continuità può dipendere dalla capacità di tagliare il cordone ombelicale con la Terra e di espandersi oltre il grembo rappresentato dal sistema solare, la vita stessa, finora, ha dimostrato di essere immortale. Come vistoso fenomeno planetario, la sua autoorganizzazione sembra violare il secondo principio della termodinamica, secondo il quale l'universo starebbe diventando meno ordinato, cioè starebbe declinando. Ma se la vita si è evoluta dall'universo, come può essa essere basata su un insieme di principi diversi da quelli dell'universo stesso? Che cos'è la vita? Abbiamo dovuto paradossalmente aspettare fino alla fine prima di tentare di rispondere a questa domanda.

Le antiche popolazioni umane vedevano la natura come *animus*, spiriti mobili, animali e dei. In un'epoca più recente, si considerò la vita sulla Terra come esempio dei processi creativi di Dio. Nel pensiero cartesiano e newtoniano, essa fu vista "oggettivamente", come parte di movimenti fisici universali. La vita gira e si ingrana come il meccanismo di un grande orologio meccanico; gli organismi agiscono e reagiscono come le palle su un tavolo da biliardo. Tutto è stimolo e risposta, causa ed effetto. Oggi sentiamo parlare di analogie nuove, proprie dell'era dei computer: gli amminoacidi sono una forma di "input", l'RNA è una "elaborazione di dati" e gli organismi sono l'"output", la "copia stampata" controllata da quel "programma matrice" o "programma principale", quel "software che si riproduce", che sono i geni. In questo libro, ci siamo attenuti a una visione un poco diversa e più astratta della vita. Questa nuova visione si ricava meno facilmente di tutte quelle visioni magiche, religiose e scientifiche, ovviamente superate. La vita, un sistema acquoso, di macromolecole basate sul carbonio, è autopoiesi che si riproduce. La visione autopoietica della vita è circolare. La vita è una macchina metabolica che non solo si riproduce, ma che immagazzina accanitamente e utilizza le informazioni in modo da resistere alla degradazione.

Buckminster Fuller, architetto filosofo, ha chiamato la bio-

sfera "la navicella spaziale Terra", che volteggia attorno al Sole, il quale a sua volta passa sfrecciando e si muove a scatti attraverso lo spazio. Ma l'analogia della Terra come navicella spaziale suggerisce l'idea che noi ne siamo i timonieri, il che non è così. Un'altra concezione ci viene presentata dal medico Lewis Thomas, il quale ha paragonato la biosfera a una cellula, così da far pensare a un'orchestrazione e a un'unità, e a un embrione, il che suggerisce una crescita futura. John Platt ha esteso la similitudine della Terra come embrione, facendo rilevare che la biosfera può correntemente passare attraverso una specie di canale del parto. Benché egli non voglia che l'analogia sia accettata acriticamente, nota che, alla fine della gravidanza, gli ormoni producono alcuni cambiamenti che compaiono immediatamente prima della nascita: cominciano cicli di dolori e la madre si rende conto che gli avvenimenti convergenti che condurranno al parto non si possono più arrestare e neppure rallentare. Questa serie di immagini suggerisce che la lenta gestazione della Terra può poi rapidamente concludersi, portando a una rapida crescita nel supercosmo. Per finire, anche se la nostra lista è ben difficilmente esauriente, James Lovelock, uno scrittore *free-lance*, esperto di chimica dell'atmosfera, vede la vita meglio rappresentata da un sistema ambientale che si autosostenga e che egli chiama Gaia.[42]

Gaia, nome dato dal romanziere William Golding (su richiesta di Lovelock) e derivato dall'antica dea greca della Terra, opera in modi misteriosi. Sistema superorganismico, che comprende tutti i viventi sulla Terra, esso conserva ipoteticamente la composizione dell'aria e la temperatura sulla superficie del pianeta, regolando le condizioni per la continuazione della vita. Mentre l'intricato intreccio delle relazioni biologiche mediante le quali la vita fa questo non è ancora ben conosciuto il fatto che il bioma terrestre controlli porzioni della superficie del pianeta è un fatto altrettanto ben stabilito di quello per cui il nostro corpo si mantiene a una temperatura costante. Gaia, così, può impedire che l'azoto e l'ossigeno atmosferici, così importanti per la vita, degenerino in nitrati e ossidi di azoto, in sali e gas esilarante che potrebbero bloccare l'intero sistema. Se non vi fosse una costante produzione a livello mondiale di

nuovo ossigeno da parte degli organismi fotosintetizzanti, se non vi fosse liberazione di azoto gassoso da parte dei batteri che utilizzano per la respirazione nitrati e ammoniaca, si svilupperebbe rapidamente attorno alla Terra un'atmosfera inerte o addirittura velenosa. Sotto l'influenza reattiva di una grande quantità di fulmini che fanno sfavillare a ogni minuto l'atmosfera terrestre, la Terra non sarebbe più ospitale per la vita di quanto lo è l'acida Venere. Sulla Terra l'ambiente è stato prodotto e controllato dalla vita proprio come la vita è stata prodotta e influenzata dall'ambiente.

La cosa sorprendente riguardo al nostro pianeta azzurro, chiazzato di bianco, è che la peculiarità della vita, con la sua incredibile diversità e caratteristica unità biochimica, continua. Essendo noi obbligati a comunicare gli uni con gli altri in una lingua tradizionale, è difficile afferrare l'idea della definizione della vita come sistema autopoietico che si riproduce. Eppure, secondo quanto Lovelock sostiene nella sua ipotesi, che egli ha chiamato ipotesi Gaia, lo stesso bioma terrestre, ivi incluso anche *Homo sapiens*, è autopoietico: riconosce, regola, e crea le condizioni necessarie per la propria ininterrotta sopravvivenza.

I reperti fossili appoggiano l'idea che la superficie terrestre sia stata soggetta senza interruzione a una regolamentazione fin dalla primissima comparsa e diffusione della vita microbica. L'ipotesi Gaia, secondo cui la temperatura e la composizione dell'atmosfera terrestre in gas reattivi sarebbero regolate attivamente dall'insieme di flora e fauna venne messa a punto da Lovelock mentre stava lavorando per la NASA sui modi di scoprire la vita su Marte. Lovelock trovò che, nella nostra atmosfera, coesistono gas che, quando vengono saggiati in sistemi chimici semplici, reagiscono prontamente, facilmente e completamente, per dare origine a composti stabili. Sembra però che questi gas rimangano separati, in apparente inosservanza delle leggi che regolano l'equilibrio chimico standard. Lovelock trovò la chimica dell'atmosfera terrestre così persistentemente bizzarra da poterla attribuire soltanto alle proprietà collettive degli organismi, in particolare al bioma terrestre. In effetti, questo, in particolare il bioma di dimensioni

microscopiche, produce costantemente enormi quantità di gas reattivi. Ricercando questi improbabili miscugli di gas nelle atmosfere di altri pianeti con spettroscopi montati su telescopi, Lovelock pensava di poter scoprire senza lasciare la Terra biosfere estranee. Rivolgendo la propria attenzione a Marte, egli trovò che questo pianeta era in un equilibrio assolutamente comprensibile sulla base soltanto della chimica e della fisica. Postulò l'assenza di vita su di esso rilevando l'assenza del fenomeno Gaia. Ma, nel 1975, la NASA, pronta per l'atterraggio sul pianeta rosso, non volle pubblicizzare la semplice soluzione che egli proponeva per l'annoso problema della vita su Marte.

Nulla, tuttavia, andò perduto. La missione Viking ebbe inizio nel 1975 e, nel 1976, due satelliti da atterraggio e due in orbita giunsero su Marte. Gli esperimenti biologici, effettuati a bordo e in seguito ad atterraggio morbido sulla superficie del pianeta, ebbero un successo spettacolare, dimostrando in modo definitivo che non vi era alcun segno di vita sul pianeta rosso. Il lavoro di Lovelock fornì una base per capire i risultati. Inoltre, l'analisi da lui condotta diede alla biosfera una nuova veste. Il mistero della vita sulla Terra era altrettanto grande di quanto questo stesso mistero lo fosse altrove, nell'universo. Perché la Terra ha un'atmosfera così diversa da quella che si può prevedere su semplice base chimica? Dato che l'ossigeno costituisce il 20% dell'atmosfera, gli squilibri relativi creati, tra gli altri gas, nel metano, nell'ammoniaca, nei gas sulfurei, nel cloruro di metile e nello ioduro di metile sono enormi. In base ai calcoli chimici, le quantità di tutti questi gas, che reagiscono così facilmente con l'ossigeno, dovrebbero essere così minime da non potersi riconoscere. Invece esse sono presenti e continuano a esserlo ogniqualvolta le si cerchi. In effetti, vi è una quantità di metano, nell'atmosfera terrestre, che è superiore di 10^{35} volte (dieci alla trentacinquesima potenza, o uno seguito da 35 zeri) alla quantità che dovrebbe esserci, considerando la quantità di ossigeno disponibile per reagire con essa. Altri gas, come l'azoto, il monossido di carbonio e l'ossido nitroso sono solo più abbondanti di 10 miliardi, 10 e 10000 miliardi di volte, rispetto a quello che dovrebbero essere sulla base della chimica soltanto.

Un ulteriore enigma riguarda la temperatura della Terra. Sembra che le leggi della fisica rendano inevitabile il fatto che la luminosità totale del Sole, cioè il suo output di energia come luce, sia aumentata negli ultimi 4 miliardi di anni, forse anche del 50%. Eppure, prove ricavate dai reperti fossili indicano che la temperatura terrestre è rimasta relativamente stabile, ondeggiando il valore medio attorno ai 22 °C circa, pressappoco la temperatura ambiente, malgrado le temperature molto basse che ci si aspetta da uno sparuto Sole primitivo. È risultato, dunque, che la vita non solo regolava su scala mondiale la composizione dei gas, ma teneva, a quanto pare, sotto una specie di controllo continuo anche la stessa temperatura del pianeta. Che cos'era questo grande termostato nascosto?

Respingendo le soluzioni mistiche, Lovelock teorizzò che il bioma terrestre, specialmente il microcosmo batterico, doveva aver regolato il proprio ambiente su scala globale fin dalla sua primissima comparsa sul pianeta. Le forme di vita reagiscono alle crisi geologiche e cosmiche che provocano perturbazioni; resistono quanto più a lungo possibile agli attacchi che vengono portati alla loro integrità individuale; e queste azioni individuali portano a una conservazione generale delle condizioni favorevoli alla sopravvivenza collettiva. (Ciò non significa affatto che non vi furono mai fluttuazioni: esse ci furono. Per esempio, a giudicare dalla grande estensione dei fossili delle foreste tropicali del Cretaceo, il pianeta doveva essere ben più caldo all'epoca dei dinosauri. Sia prima sia dopo buona parte della sua superficie fu coperta da ampie distese di ghiaccio. Ma sia tra l'una e l'altra di queste fluttuazioni sia dopo di esse, la Terra si stabilizzò, non arroventandosi come Venere, né congelando come Marte.)

Se il bioma terrestre non avesse risposto alle principali perturbazioni esterne come l'aumento della luminosità solare o gli impatti meteoritici, tanto devastanti quanto lo sono oggi le bombe nucleari, non saremmo qui ora. La vita, concludeva Lovelock, non è circondata da un ambiente essenzialmente passivo a cui essa è adattata. Al contrario, essa fa e rifà il proprio ambiente. L'atmosfera, come un alveare o un nido di uccello, è parte della biosfera. Poiché l'anidride carbonica viene

trasformata nelle cellule e può anche essere utilizzata per controllare la temperatura dell'atmosfera, è probabile che un modo in cui la vita regoli la temperatura del pianeta sia modulando il livello atmosferico di anidride carbonica.

Alcuni scienziati contestano l'analisi di Lovelock. L'idea della vita sulla Terra come superorganismo che risponde alle minacce e agli insulti ambientali per assicurarsi la sopravvivenza non concorda con le idee ormai accettate dell'evoluzione darwiniana, la quale dipende dalla *competizione* tra organismi in lotta. Ammettendo che Lovelock abbia ragione, come fa la massa di geni in lotta all'interno delle cellule di organismi localizzati sulla superficie terrestre a *sapere* che deve affrontare delle crisi? In che modo i microbi sono stati in grado di far fronte all'aumento delle concentrazioni di ossigeno nell'atmosfera? Come poterono essi agire insieme, come un'entità concertata, coordinata, per fronteggiare simili crisi? W. Ford Doolittle, l'esperto di biologia molecolare che ha effettuato una ricerca, germe di ulteriori sviluppi, sulla biologia molecolare dei plastidi, protestò contro questa nozione di natura, come egli la definiva, "materna". Richard Dawkins, zoologo dell'Università di Oxford, paragonò l'ipotesi Gaia al programma "BBC Theorem", con un riferimento spregiativo alla nozione della natura come equilibrio e armonia meravigliosi, data dai documentari televisivi. Dawkins non poteva concepire l'evoluzione dei meccanismi di Gaia, di controllo a livello mondiale, senza un universo «pieno di pianeti morti, i cui sistemi di regolazione omeostatica erano venuti meno, e con una manciata di pianeti ben regolati, ben riusciti, sparsi tutt'attorno e di cui uno era la Terra.»[43]

Per rispondere a queste critiche, Lovelock progettò alcuni modelli matematici. Quello più spettacolare, il Daisy World (il mondo delle margherite), considera un pianeta mitico che può essere ricoperto soltanto da margherite nere e bianche e da un'occasionale mucca che mastica rumorosamente margherite. Le margherite rappresentano due specie, che crescono entrambe a chiazze e ricoprono fino al 70% del pianeta entro intervalli specifici di temperatura. Entrambe non crescono affatto dove fa molto freddo, crescono lentamente al freddo, più rapi-

damente al caldo e non crescono affatto, anzi muoiono, alle temperature opprimenti al di sopra dei 45 °C.

Lovelock, che in seguito cominciò a lavorare con Andrew Watson alla Marine Biological Association di Plymouth, in Inghilterra, trovò che le margherite bianche e nere potevano funzionare come un gigantesco termostato, rendendo stabile la temperatura di un intero pianeta semplicemente crescendo. Il fenomeno non è misterioso, ma sinergico: è il risultato inatteso di un sistema complesso.

Si può immaginare come operi Daisy World. Si prenda un pianeta di margherite nere e bianche, che ruoti attorno a una stella, il Sole, la quale rallenta ma diventa costantemente più brillante. All'inizio, essendo il Sole freddo, non cresceranno molte margherite. A mano a mano che esso diventerà più caldo, chiazze di margherite di entrambi i colori spunteranno e cresceranno rigogliosamente. Ma, quando le margherite nere fioriranno e produrranno un maggior numero di discendenti, perché sono scure e assorbono la luce del Sole, impediranno a questa luce di essere di nuovo riflessa nello spazio. La crescita di macchie di margherite nere, che assorbono calore, ha l'effetto di riscaldare un pianeta che, altrimenti, sarebbe freddo. Ma ben presto l'ambiente circostante raggiunge un calore opprimente e comincia a limitare la crescita delle margherite nere nelle immediate vicinanze. L'aumento delle temperature locali porta a un aumento globale della temperatura più forte del previsto, in un mondo senza margherite. Cominciano allora a crescere chiazze di margherite bianche. Ciò porta a un aumento della riflettività planetaria, o albedo, dato che la superficie bianca dei petali delle margherite riflette la luce nello spazio, con la conseguenza di un ritorno su tutto il pianeta a temperature più fredde. Le margherite nere ricominciano a spuntare. Ma il Sole, nel frattempo, continua a diventare più caldo e le margherite bianche, riflettendo il calore, continuano a fiorire e a raffreddare il pianeta. In breve, il Sole diventa più caldo, si formano chiazze sempre più estese di margherite bianche, Daisy World diventa più freddo, il che porta a una nuova crescita di chiazze di margherite nere, le quali di nuovo si surriscaldano, creando ancora una volta le condizioni più favorevoli alle

margherite bianche. Ciò raffredda nuovamente Daisy World incrementandone l'albedo, e così via fino a che il Sole diventa una gigante rossa e brucia tutte le margherite. Ma, entro certi limiti di temperatura, le margherite funzionano molto semplicemente da termostato, mantenendo il mondo vivibile, malgrado un aumento potenzialmente letale della quantità di energia solare che raggiunge il pianeta. I fiori regolano silenziosamente la temperatura del pianeta fino a un grado notevole, entro quello stretto intervallo che è necessario per la loro sopravvivenza quando il Sole si riscalda inesorabilmente.

In modelli più simili al mondo reale sono la crescita, il metabolismo e le proprietà che riguardano gli scambi di gas nei microbi, più che le margherite, a formare i complessi sistemi di retroazione fisici e chimici che modulano la biosfera in cui viviamo. Gli organismi viventi, attraverso il loro effetto sull'acqua e sulle nubi, hanno un'immensa influenza modulatrice sulla Terra. Tanto per fare un esempio, minuscole alghe che galleggiano sul mare possono ipoteticamente far entrare il mondo in un'epoca glaciale semplicemente crescendo più rapidamente alle latitudini settentrionali. Nel produrre i guscetti di carbonato di calcio, morendo e inabissandosi sul fondo dei mari, rimuovono il carbonio necessario per produrre anidride carbonica; poiché l'anidride carbonica è un gas da "effetto serra", che agisce come un manto invisibile che fa entrare la luce e la trattiene sotto forma di calore, una minore quantità di anidride carbonica nell'atmosfera si traduce in un abbassamento delle temperature. Ma, con temperature più basse, le alghe crescono meno, meno anidride carbonica viene rimossa dall'aria per produrre guscetti e il pianeta diventa tropicale. I circuiti di retroazione sono, perciò, così strettamente collegati che una morìa massiccia di alghe marine, accoppiata all'erosione di rocce carbonatiche da parte dell'acqua, processo che libera l'anidride carbonica nell'atmosfera, può anche provocare un *aumento* termico dell'atmosfera.

In effetti, nel 1979 e 1980, ricercatori europei hanno analizzato dell'aria "fossile", rimasta intrappolata nei ghiacci polari e hanno trovato che circa 20000 anni or sono, al culmine dell'ultima glaciazione, l'anidride carbonica aveva una concentra-

zione pari a solo due terzi di quella che si sarebbe avuta all'inizio della Rivoluzione industriale. Immediatamente prima che gli esseri umani diventassero agricoltori e costituissero le prime civiltà, l'anidride carbonica raggiunse il livello preindustriale. L'aumento dell'anidride carbonica e della temperatura 12000 anni or sono ebbe luogo in meno di 100 anni e non può essere interamente spiegato da processi tradizionali geofisici o geochimici, come l'attività tettonica o il corrugamento. Una fluttuazione così improvvisa poteva provenire soltanto dalla vita. Lovelock ritiene che l'improvvisa morìa di una percentuale sostanziale di alghe marine causò probabilmente questo rapido aumento nella temperatura mondiale, una trasformazione ambientale che alla fine permise agli esseri umani di uscire dalle caverne e di popolare la Terra.

Col tempo, il bioma terrestre edificò elaborati sistemi di controllo di cui solo ora stiamo diventando vagamente consapevoli. La moltitudine dei sistemi sensoriali negli organismi viventi, la capacità di questi di avere un metabolismo e una crescita esponenziale e la straordinaria diversità dei viventi che interagiscono sulla Terra sono sufficienti a spiegare, in teoria, la modulazione ambientale su scala globale.

Ma questo genere di modulazione ambientale opera anche su una scala più piccola. Anche sulla scala di gran lunga più piccola dei singoli animali, la regolazione della temperatura comporta più di un semplice singolo sistema di retroazione. Realizziamo un esperimento mentale in cui una persona (un insieme di cellule, come il bioma terrestre) deve affrontare un netto calo della temperatura ambientale. Il suo primo tipo di risposta sarebbe la tattica evolutasi più di recente: una risposta da alta tecnologia, che consisterebbe nel girare il termostato, nell'inserire il radiatore elettrico, o addirittura nel pagare per un servizio di teleriscaldamento attraverso un modem del proprio computer domestico. Benché queste modalità diventeranno forme sempre più comuni di regolazione della temperatura, esse sono così recenti da essere ancora estremamente incerte tra i vari sistemi di retroazione. A un livello più basso, vi sono invece le risposte da "bassa tecnologia" ai rischi delle basse temperature: avvolgersi in coperte e vestirsi con abiti più pe-

santi. Questo tipo di tecnologia, ereditata dall'abitudine di prendere in trappola gli animali di climi freddi o cacciarli, utilizzando poi le loro pelli e pellicce folte per proteggersi, è antica di circa 100000 anni. Il cucito, un suo importante perfezionamento, potrebbe, a giudicare dai reperti archeologici di aghi per cucire in legno, aver aiutato le popolazioni orientali ad attraversare lo Stretto di Bering per recarsi nell'America settentrionale. Il circuito di retroazione dei vestiti è semplice: quando la temperatura si abbassa, i vestiti vengono indossati; quando si innalza, i vestiti vengono tolti. La regolazione della temperatura, come comportamento, ha fatto la sua comparsa negli esseri umani molto prima che venissero costruiti i sistemi di riscaldamento a base di combustibili fossili ed è ancora predominante. Tutti i popoli della Terra oggi vestono capi di abbigliamento.

Se continuiamo a sottoporre il soggetto del nostro esperimento a uno stato di stress, indurremo in lui un metodo di regolazione della temperatura ancora più antico e ancora più affidabile: si tratta dei sistemi comportamentali, non tecnologici, di retroazione. Queste risposte si possono fare risalire a qualcosa come 200 milioni di anni or sono e consistono nel correre, nel fregarsi braccia e gambe, nel rannicchiarsi e nell'assumere la posizione fetale, arrotolandosi, quando si ha freddo. Quando sono minacciati dal caldo, i mammiferi come noi reagiscono con un comportamento opposto: stendono gli arti e cercano l'ombra. In generale diventano meno attivi. Tutti i mammiferi condividono questo tipo di meccanismo di controllo della temperatura, che dipende dall'avere un sistema nervoso sufficientemente complesso, base del comportamento appreso. A mano a mano che ci avviciniamo al microcosmo originale, i sistemi di retroazione diventano ancora più prevedibili, fondamentali e affidabili.

Ancora più antichi dei sistemi comportamentali sono i tipi di controllo rigorosamente fisiologici. Quando l'ambiente si raffredda, i vasi sanguigni dei mammiferi si allontanano automaticamente dalla superficie cutanea per contrazione dei muscoli che si trovano nelle loro pareti. Più lontano dalla pelle, il sangue viene rifornito agli organi vitali in maggiore quantità e

gli organi risultano così più protetti. Segue il congelamento: le dita delle mani e dei piedi ed altre estremità diventano fredde come ghiaccio e intirizzite. Se il soggetto è ancora sotto stress, si ha il distacco delle estremità. Il naso e la punta delle orecchie, le dita delle mani e dei piedi si staccano. La sudorazione, che è la risposta opposta, si basa sull'evaporazione di acqua per raffreddare il corpo. Queste risposte fisiologiche alla temperatura sono ancora più antiche e ben radicate delle altre. Forse sono tanto antiche quanto gli stessi animali (circa 600 milioni di anni or sono).

Se, nel nostro esperimento mentale, continuiamo a sottoporre il soggetto alla tensione del freddo, spingiamo fino al limite il suo sistema autopoietico e mettiamo a nudo l'antico metodo genetico di controllo della temperatura. Se l'ambiente diventa freddo oltre il limite di tolleranza dell'uomo, questi muore e non lascia (ulteriore) prole. Se la tensione del freddo continua, l'intera popolazione e comunità congela fino a morire senza lasciare discendenti. Tuttavia, nuove popolazioni e comunità sostituiscono le vecchie, e alcune hanno mezzi più efficaci per combattere il freddo. Solo organismi diversi o mutanti, in grado di tollerare condizioni climatiche rigide, riusciranno a sopravvivere. Un'enorme pressione selettiva viene esercitata su quegli organismi che possono migliorare gli effetti dell'ambiente freddo circostante.

Questo è ciò che è avvenuto di solito nel mondo. Se la tensione è abbastanza forte, sopravviveranno soltanto gli organismi tolleranti. In altre parole, quando fa troppo caldo, le cellule muoiono. Quando fa troppo freddo, le cellule muoiono. Quando la temperatura è giusta, le cellule lasciano una numerosa progenie. Ma il "giusto" della temperatura dipende da ogni genere di vita. La selezione naturale darwiniana è l'ultimo antico sistema di retroazione di Gaia su cui tutti quelli tecnologici e comportamentali più recenti si basano. Oggi, se si ha freddo si accende il riscaldamento, quindi ci si mette un maglione, poi si comincia a tremare per generare calore. Se il freddo incalza ancora, si entra in uno stato di torpore, in cui il metabolismo si abbassa; se il freddo aumenta ancora e non cede, si muore. Ma la morte individuale fa parte di sistemi più

ampi di stabilizzazione ambientale. Prima di morire, l'individuo ha fatto aumentare la temperatura ambientale e, morendo e non lasciando una prole simile a sé, ha fatto diminuire le probabilità che i futuri periodi di freddo distruggano la vita, spianando la via alla riproduzione di organismi adattati alle basse temperature.

Sistemi viventi di regolazione della temperatura e dell'atmosfera a livello planetario possono solo essere immaginati. Da una prospettiva planetaria, tuttavia, non sembra che essi siano in un equilibrio naturale difficile, sull'orlo del collasso. Al contrario sono vigorosi. I sistemi di controllo ambientale più importanti sono le istituzioni microcosmiche collaudate dal tempo, che producono gas e modificano l'albedo, e che sono di gran lunga più resistenti e più antiche della combustione di oli minerali per riscaldamento e dell'impiego di termostati domestici. Per quanto riguarda il futuro, la nostra specie potrebbe essere come quelle margherite nere rigogliose, che crescono così rapidamente da rendere ottimale l'ambiente per altre margherite, perfino quando si arroventano fino alla morte. Ogni individuo, popolazione o specie è un'opzione che si esercita soltanto in condizioni favorevoli. In caso di catastrofe, come regolarmente avviene nella storia della vita, alcune opzioni non saranno più valide. Ma la loro fine, sia come morte individuale sia come estinzione, renderà la biosfera nel suo insieme più robusta, più complessa e con maggiore capacità di ripresa. (Ciò, naturalmente, non ha nulla a che vedere con il progresso o il benessere umano. Nella documentazione fossile non si nota alcun segno di progresso, solo di cambiamento ed espansione.)

Inoltre, sembra che la maggior parte delle opzioni procariotiche non si sia ancora estinta. Né l'esistenza né l'estinzione di specie sono una proprietà dei batteri. Benché la morte individuale dei batteri avvenga senza interruzione, forti pressioni sul regno delle monere per la capacità di effettuare scambi genici a livello mondiale hanno portato al rapido scambio di biotecnologie naturali, a enormi tassi di crescita delle popolazioni e, in generale, alla capacità di resistere con attitudini metaboliche intatte anche durante le più gravi crisi planetarie.

Solo con un'esplorazione scientifica completa dei meccanismi di controllo di Gaia ci si può attendere di attuare nello spazio habitat viventi che si autosostentino. Se mai dovessimo progettare ecosistemi chiusi in grado di rifornire le loro proprie riserve vitali, dovremmo studiare la tecnologia naturale della Terra. Abitare altri mondi, avere la possibilità di passeggiare in giardini, per esempio, su Marte, è un progetto gigantesco, che si può pensare soltanto da una prospettiva di Gaia. Dovremmo conoscere le nostre radici nel microcosmo prima di andare in quel limbo che è il supercosmo. Ma, sia che l'uomo porti nello spazio l'ambiente primevo dell'antico microcosmo sia che, cercando di farlo, muoia, sembra proprio che la vita sia tentata in questa direzione. E la vita, finora, ha resistito a tutto, tranne che alla tentazione.

Note

[1] Gli eucarioti includono i ben noti regni animale e vegetale e i meno noti regni dei funghi e dei protoctisti. Il termine informale *protisti* si riferisce ai membri microbici, spesso unicellulari, del regno dei protoctisti. I protoctisti includono le amebe, i ciliati, i parassiti della malaria (e, in generale, i protozoi), le diatomee, le alghe marine (e, in generale, le alghe), reti di filamenti mucillaginosi, muffe acquatiche (*Saprolegnia*), missomiceti, parassiti plasmodiali di piante, e organismi meno noti che non rientrano negli altri regni. Si stima che vivano oggi circa 200000 specie di protoctisti, raggruppati in circa 50 phyla. Gli altri tre regni di eucarioti, in ordine di evoluzione, sono gli animali, che si sviluppano da embrioni, formatisi per fusione di uno spermatozoo con una cellula uovo; i funghi: muffe, funghi eduli, lieviti, ruggini, carboni e organismi affini che si sviluppano da spore; infine, le piante: muschi, epatiche, felci, conifere e angiosperme, che si sviluppano da embrioni, circondati da tessuto materno. Il quinto, e più antico regno vivente a essersi evoluto, è il regno delle monere, composto interamente da procarioti o batteri. (I numerosi nomi dei batteri – monere, procarioti, germi, eccetera – derivano dal fatto che sono stati studiati separatamente nell'ambito di differenti campi della scienza. La storia naturale, la botanica, la microbiologia, la medicina, l'agricoltura e la zoologia hanno conservato tradizioni estremamente diverse nell'identificare, denominare e classificare i microbi.) Il termine *microbo* non ha alcun significato specifico in tassonomia o nell'evoluzione ed è equivalente a *microrganismo*, che significa un organismo visibile in primo luogo al microscopio. Tutti i procarioti e molti eucarioti, come i protisti e alcuni funghi, sono anche microbi nel senso che hanno dimensioni al di sotto del potere di risoluzione dell'occhio umano. Poiché *microrganismo* e *microbo* sono sinonimi, in generale utilizziamo in questo libro il secondo termine, più biologico e meno medico.

[2] Alcuni biologi non credono ancora nell'origine simbiotica dei mitocondri, dei cloroplasti e di altri organelli degli eucarioti. Tuttavia, essi sono sempre più una minoranza. Si spera che il peso delle prove presentate in questo volume convincerà quei biologi, così come ogni altra persona, della necessità di considerare la vita come un fenomeno simbiotico.

[3] Charles Darwin, *The Variation of Animals and Plants under Domestication*, Vol. II, Organe Judd, New York, 1868, pag. 204 (trad. it., *Variazione degli animali e delle piante allo stato domestico*, Unione Tipografico-Editrice Torinese, Torino, 1876).

[4] Francis Crick, *Life Itself: Its Origin and Nature*, Simon & Schuster, New York (1981) (trad. it., *L'origine della vita*, Garzanti, Milano, 1983).

[5] Steven Weinberg, *The First Three Minutes*, Basic Books, New York, 1977 (trad. it., *I primi tre minuti*, Oscar Mondadori, Milano, 1980).

[6] Il rimanente un per cento del peso secco degli organismi consta di elementi più rari, ma ugualmente indispensabili, comprendenti lo zinco, il potassio, il sodio, il manganese, il magnesio, il calcio, il ferro, il cobalto, il rame e il selenio.

[7] Nel 1979, Stanley M. Awramik dell'Università della California a Santa Barbara scoprì microstrutture pluricellulari filamentose e rotondeggianti, sorprendentemente ben conservate, nelle rocce della Warrawoona Formation in Australia, che hanno anch'esse all'incirca 3 miliardi e 400 milioni di anni. Se quei fossili hanno la stessa età delle rocce circostanti, questo ritrovamento dimostra che strutture ancora più complesse esistevano prima di quanto pensassimo. Ma la datazione radioattiva non può essere effettuata direttamente su rocce sedimentarie (le uniche che contengano fossili), perché sono composte da particelle di differenti età. Le date devono essere stimate partendo da una datazione sicura, effettuata sulle rocce vulcaniche circostanti. Nel campione australiano, essendo le rocce sparse quando vennero raccolte e non essendo chiaro da dove provenissero, la datazione dei fossili non è certa.

[8] Il carbonio, allo stato naturale, si presenta in diverse forme, chimicamente quasi identiche, ma fisicamente differenti. Queste differenze sono dovute al numero dei neutroni nel nucleo dell'atomo. La maggior parte del carbonio attorno a noi è nella forma stabile ^{12}C; meno dell'un per cento è nell'isotopo stabile ^{13}C; una quantità ancora più piccola è nella forma radioattiva instabile ^{14}C. Poiché nel processo fotosintetico gli organismi favoriscono l'impiego di ^{12}C, il rapporto tra ^{12}C e ^{13}C nei materiali naturali è stato utilizzato per ricavare indizi sul fatto che certi depositi di carbonio fossero o no originati per fotosintesi.

[9] Il fattore per calcolare la crescita batterica è 2^n, dove n è uguale al numero di generazioni. Così, tre generazioni all'ora per 48 ore è uguale a 2^{144} batteri.

[10] Le spore servono per sopravvivere a lunghi periodi di siccità o ad altre condizioni avverse. Un involucro si forma attorno al materiale genetico che è responsabile della sintesi delle proteine e si altera chimicamente, dopodiché il resto della cellula si disintegra. La spora germina di nuovo quando le condizioni ritornano favorevoli. È noto che le spore batteriche rimangono quiescenti per decenni e possono rapidamente ritornare alla vita attiva. Benché la durata della vita umana impedisca di effettuare prove dirette, è possibile che spore umane completamente disidratate possano durare per centinaia, se non addirittura per migliaia di anni.

[11] Sorin Sonea, Maurice Panisset, *The New Bacteriology*, Jones and Bartlett, Boston, 1983, pag. 22.

[12] L'idea che la vita non solo usi il proprio ambiente e sia fatta di esso, ma anche regoli la composizione chimica dell'atmosfera (tenendola lontana dall'equilibrio chimico) costituisce l'ipotesi Gaia.

[13] Sonea, Panisset, op. cit., pag. 85.

[14] Citato da Frederick Turner, *Cultivating the American Garden*, in "Harper Magazine", Agosto 1985, pagg. 45-52. Per ulteriori particolari, si veda *Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution*, a cura di William Schopf, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1983. Il volume curato da Schopf prospetta un'analisi tecnica e differenti punti di vista sulla primissima fase della vita. Per un testo meno tecnico di nozioni fondamentali, riguardanti il periodo spesso trascurato che va dalle origini della vita all'origine delle cellule eucariotiche circa un milione di anni or sono, si veda Lynn Margulis, *Early Life*, Jones and Bartlett, Boston, 1982.

[15] James Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, New York, 1979, pag. 69 (trad. it., *Gaia. Nuove idee sull'ecologia*, Boringhieri, Torino, 1981).

[16] Chet Raymo, *Biography of a Planet*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984, pag. 72.

[17] W.H.F. Doolittle e Carmen Sapienza, *Selfish genes: the phenotype paradigm and genome evolution*, in "Nature", **284**, 601, 1980.

[18] Un metro di DNA per cromosoma per 46 cromosomi per cellula è uguale a 46 metri di DNA per cellula; questo valore, moltiplicato per 10 quadrilioni (milioni di miliardi) di cellule per organismo dà 460 quadrilioni di metri di DNA per organismo. La Luna è solo a 200 miliardi di metri di distanza.

[19] Comunicazione orale. Per particolari si veda R. Klein e A. Cronquist, *A consideration of the evolutionary and taxonomic significance of some biochemical micromorphological and physiological characters in the Thallophytes*, in "Quarterly Review of Biology", **42**, 105, 1967.

[20] Per riferimenti e particolari sull'opera di Jeon (come pure su tutti gli aspetti tecnici della biologia microbiologica e cellulare, su cui si basa questo volume), si veda Lynn Margulis, *Symbiosis in Cell Evolution*, W.H. Freeman, San Francisco, 1982.

[21] Per particolari sulle riunioni organizzate da Axelrod per i giochi a somma nulla, si veda Robert M. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, Basic Books, New York, 1984 (trad. it., *Giochi di reciprocità. L'insorgenza della cooperazione*, Feltrinelli, Milano, 1985).

[22] *Thermoplasma* cresce in maniera ottimale in un'atmosfera che contenga circa il 5% di ossigeno e muore molto prima che l'ossigeno raggiunga nell'ambiente il livello corrente, cioè il 20%.

[23] Alcuni eucarioti che vivono in simbiosi nell'interno anaerobico di altri organismi hanno perso i mitocondri (la loro struttura e il loro comportamento riproduttivo li identificano chiaramente come eucarioti, non come batteri evolutisi senza mitocondri). Altri eucarioti hanno perso i mitocondri e quindi hanno acquisito nuovi batteri simbionti come surrogati dei mitocondri perduti (simbiosi all'interno di una simbiosi). Questi surrogati non sono esattamente nuovi mitocondri, dato che funzionano in un ambiente con una concentrazione di ossigeno molto inferiore a quella che è necessaria ai mitocondri per poter sopravvivere. Tuttavia, sembra che esercitino le stesse funzioni.

[24] 1 angstrom = 1 decimiliardesimo di metro; 10000 angstrom = 1 micrometro; 1 micrometro = 1 milionesimo di metro. Le cellule batteriche hanno generalmente un diametro di circa un micrometro. Mille micrometri costituiscono un millimetro e diecimila micrometri un centimetro. Una sfera di circa 500 micrometri può essere vista, come un minuscolo granello di sabbia, a occhio nudo. Il microcosmo subvisibile, fatto di oggetti rilevabili con vari tipi di microscopi, si estende così da centinaia di micrometri a circa 0,001 micrometri o 10 angstrom, lunghezza della sezione trasversale dell'elica di DNA.

[25] David C. Smith, *From extracellular to intracellular: the establishment of a symbiosis*, in "Proceedings of the Royal Society" (London), **204**, 115, 1979.

[26] Poiché il termine *flagelli*, come ricordato prima, si riferisce anche ai prolungamenti simili a frustini, che si dipartono dal motore rotatorio dei batteri, è meglio chiamare *undulipodi* i flagelli degli eucarioti e riservare il termine *flagelli* esclusivamente ai batteri.

[27] Charles Darwin, *The Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favored Races in the Struggle of Life*, prima edizione, 1859; edizione

recente, a cura di W. Burrows, Penguin Classics Edition, 1968, ristampata nel 1981 (Penguin Limited, Harmondsworth, Middlesex, Inghilterra), pag. 453 (trad. it., *L'origine delle specie per selezione naturale - la preservazione delle razze privilegiate nella lotta per la vita*, a cura di Pietro Omodeo, dall'edizione originale integrale del 1859 con appendici che riportano le varianti dell'edizione del 1872, Newton Compton Editori, Roma, 1973).

[28] M.A. Sleigh, *Origin and Evolution of Flagellar Movement* in "Cell Motility", **5**, 137, 1985. Questa pubblicazione presenta gli atti di un seminario tenutosi nell'ambito dello U.S.-Japan Cooperative Science Program *Fundamental Problems of Movement of Cilia, Eukaryotic Flagella and Related Systems*.

[29] D. Wheatley, un anatomico inglese, ha scritto un libro dal titolo *The Centriole: A Central Enigma* (Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, New York, 1983), in cui passa in rassegna una grande quantità di riferimenti bibliografici sulla biologia della cellula, ma lascia irrisolto l'enigma che compare nel titolo.

[30] Albert Einstein, *Letter to Jacques Hadamard*, in Jacques Hadamard, *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton University Press, 1945, pagg. 142-143 (ristampato da Dover Publications, Inc., New York, 1954).

[31] John von Neumann, *The Computer and the Brain*, Yale University Press, New Haven, 1958, pag. 82.

[32] Citato in Alan Moorehead, *Darwin and the Beagle*, Harper & Row, New York e Evanston, Ill., 1969, pagg. 259-261.

[33] *The Damned Human Race*, in Mark Twain, *Letters from the Earth*, a cura di Bernard DeVoto, pagg. 215-216, I edizione, 1938; ristampata da Harper & Row Publishers, New York, 1962 (trad. it., *Lettere dalla terra*, Editori Riuniti, Roma, 1982).

[34] Il libro di Calder *Timescale: An Atlas of the 4th Dimension*, Viking Press, New York, 1983, è un'indispensabile lettura per chiunque sia interessato al microcosmo in espansione. Solo negli anni recenti si è sviluppata una visione esauriente di come si sia evoluta la vita sul nostro pianeta. Esiste più di una storia della vita sulla Terra e vi sono una costante discussione scientifica e una revisione di particolari. Calder confronta questo nuovo campo di indagine sulla storia della vita alle prime costruzioni di mappe e gli scienziati che vi si dedicano ai primi cartografi che hanno rappresentato le terre emerse e i mari. Il suo libro, che «tenta di mettere ordine negli avvenimenti significativi che si sono svolti tra l'origine dell'universo e il tempo attuale», è uno dei primi atlanti di questa nuova disciplina, detta cronografia, cioè mappatura del tempo. Esso dimostra che la storia è qualcosa di più di una raccolta di dati, di vasi d'argilla e di nomi di re. In verità, la storia scritta tradizionale, che si insegna sui libri di testo, è solo la punta dell'iceberg. La vera storia è la preistoria, il nostro retaggio vivente. Coloro che desiderano approfondire questo nuovo campo della scienza dovrebbero leggere *Biography of a Planet* di Chet Raymo (Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.Y., 1984). Questo libro, scritto a un livello introduttivo, è un'ottima guida allo sviluppo della vita fin dalle sue origini, oltre tre miliardi di anni or sono.

[35] William Irwin Thompson, *On Food-Sharing, Communion, and Human Culture*, discorso tenuto nella Cathedral Church of St. John the Divine, l'1 novembre 1981.

[36] Thompson, uno dei critici sociali più seri del nostro tempo, ha scritto *The Time Falling Bodies Take to Light*, St. Martin's Press, New York, 1981, un delizioso libro in cui esamina la tendenza della nostra specie per la mitopoiesi, o creazione di miti, che noi allora prendiamo molto seriamente.

[37] John R. Platt, *The Acceleration of Evolution*, in "The Futurist", febbraio 1981.

[38] Per un'analisi brillante dello straordinario percorso sociale che si deve compiere

perché un'osservazione possa diventare una verità scientifica, si veda Ludvik Fleck, *The Genesis and Development of a Scientific Fact*, di cui una bella versione annotata è stata pubblicata in inglese, tradotta dal tedesco, in una brossura economica dalla Chicago Press nel 1979 (trad. it., *Genesi e sviluppo di un fatto scientifico*, Il Mulino, Bologna, 1983).

[39] Questa storia si può trovare in *The Science Fiction Hall of Fame*, a cura di Robert Silverberg, Doubleday, Garden City, N.Y., 1970, Vol. 1, pagg. 97-111.

[40] Christopher Evans, *The MicroMillennium*, Washington Square Press, New York, 1981, pagg. 112-121. Il libro contiene proiezioni sul futuro dei calcolatori, a breve, medio e lungo termine.

[41] Norbert Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1961, pag. 176 (trad. it., *La cibernetica. Controllo e comunicazione nell'animale e nella macchina*, Il Saggiatore, Milano, ^{2}1982).

[42] Per una brillante discussione dell'ipotesi Gaia da parte del suo inventore, si veda: James Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth* (op. cit. in nota 15).

[43] Richard Dawkins, *The Extended Phenotype*, W.H. Freeman, San Francisco, 1982, pag. 236 (trad. it., *Il fenotipo esteso. Il gene come unità di selezione*, Zanichelli, Milano).

Glossario

Autopoiesi Insieme di processi biologici energetici ininterrotti, che riguardano la formazione dei composti del carbonio e che sono indispensabili a tutti gli esseri viventi per potersi mantenere.

Bioma terrestre L'insieme di tutti gli esseri viventi sulla Terra.

Biosfera L'insieme di tutti gli esseri viventi sulla Terra e del loro ambiente.

Cinetocoro Parte specializzata del cromosoma, che serve ad attaccarlo ai microtubuli del fuso mitotico.

Cloroplasti Organelli verdi, presenti nelle alghe e nelle piante e derivati da antichissimi batteri simbionti fotosintetizzanti.

Devoluzione Proliferazione incontrollata di specie, che precede spesso la loro estinzione.

DNA Molecola matrice, che si riproduce, si ricombina e muta e passa di generazione in generazione, producendo sempre nuove molecole di sé, partendo da materiali che trova nell'ambiente cellulare circostante.

Gaia Dea greca della Terra, il cui nome è stato preso a prestito per suggerire l'autopoiesi della biosfera come un tutto.

Iperciclo Ipotetico stadio nell'evoluzione chimica, svoltasi sulla Terra primitiva. Comporta reazioni chimiche non viventi, interagenti tra loro e che si catalizzano a vicenda, fino a che non emergono autopoiesi e, infine, riproduzione.

Macrocosmo Mondo visibile di piante, animali e funghi di maggiore volume.

Meiosi Processo di divisione cellulare, che comporta la riduzione del numero di cromosomi per ottenere cellule sessuali: spermatozoi, cellule uovo e spore.

Microcosmo Mondo costituito da microrganismi non visibili a occhio nudo: batteri, protoctisti e funghi microscopici.

Microtubuli Organelli cellulari, lunghi e sottili, in forma di tubicini. Sono costituiti da proteine. Hanno un'inconfondibile microstruttura e abbon-

dano in natura. Potrebbero essere le vestigia di batteri a vita libera, conformati a cavatappi e chiamati spirochete.

Mitocondri Organelli delle cellule nucleate, che costituiscono una parte integrante del processo in cui viene sfruttato l'ossigeno come fonte di energia. La maggior parte dei biologi ritiene che essi si siano evoluti da batteri a vita libera, aventi una forma a bastoncello.

Mitosi Processo che si svolge durante lo sviluppo cellulare e che comporta la partecipazione dei cromosomi; per suo tramite le cellule nucleate si riproducono (si dividono).

Protisti Microbi costituiti da cellule nucleate. Fanno parte dell'unità tassonomica dei protoctisti.

Regolite Rivestimento, o manto, roccioso di un pianeta.

Ribosomi Piccoli organelli all'interno delle cellule, sui quali avviene la sintesi delle proteine.

RNA Molecola con struttura analoga a quella del DNA (anch'essa si riproduce) e utilizzata per trasmettere l'informazione genetica che serve a dirigere la formazione di proteine.

Selezione naturale Processo di "epurazione", che elimina necessariamente la maggior parte degli organismi, come conseguenza della propensione che essi hanno a produrre più organismi di quanti possano sopravvivere. È una conseguenza del fatto che la mancanza di spazio, di cibo o di altre condizioni impedisce la crescita e la riproduzione continue.

Simbiosi Convivenza di due o più specie per la maggior parte dei loro rispettivi cicli vitali, con reciproco vantaggio.

Spirochete Batteri che si muovono rapidamente e che hanno una forma a cavatappi.

Strutture dissipative Sedi ben delimitate nell'universo, attraverso le quali materia, energia e informazione fluiscono, creando un'abbondanza locale di ordine.

Superorganismo Gruppo di organismi così integrati sotto il profilo evolutivo da poter essere trattati come un singolo organismo.

Undulipodi Prolungamenti cellulari in forma di frustino, composti di una serie ordinata di microtubuli; si trovano in molte cellule nucleate.

Indice analitico

Acido solfidrico, 102
Acritarchi, 119, 120
Acritarchi fossili, 121
Actina, 197
Actomiosina, 196
Adeano, eone, 34
Adenina, 46, 56
Adenosintrifosfato, 43
Albedo, 287
Aldeide formica, 102
Alghe, 182
Alghe azzurre, 123
Alghe rosse, 180
Alvarez L., 216
Alvarez W., 216
Amebe batterizzate, 126
Amminoacidi, 43
Ammoniaca, 34, 92
Anellidi, 188
Anfibi, 213
Angiosperme, 185
Archeano, 35, 38
Archeociatidi, 192, 193, 243
Archibatteri, 139
Aria "fossile", 288
Artropodi, 188
Atmosfera primitiva, 43
Attinobatteri, 180
Attinopodi, 146
Australopitecini, 222, 228
Australopithecus, 229
Australopithecus afarensis, 231, 239
Australopithecus robustus, 229
Autopoiesi, 50, 271, 273
Avery O.T., 5, 86
Axelrod R., 128, 129
Azotobatteri, 75

Barghoorn E.S., 67, 68, 70
Bastoncelli, 158
Bateson G., 50
Batteri, 5
Batteri, evoluzione, 255
Batteri azotofissatori, 9, 75
Batteri fermentanti, 74
Batteri fotosintetizzanti, 77, 101
Batteri magnetotattici, 246
BBC Theorem, 286
Bdellovibrio, 135
Big Bang, 31
Biochip, 269
Biologia molecolare, 87
Bioluminescenza, 111, 160
Biosfera, 61
Biosphere II, 245
Biota, 61
Blake W., 266
Blastula, 181
Blumenburg B., 229
Brachiopodi, 191
Buffon G.L.L. de, 190
Butler S., 273, 274, 279

Calcio, 195, 196

Calder N., 226
Calvin W.H., 225
Cambriano, esplosione del, 69
Cancro, 156, 157
Carbonio, 69
Carotenoidi, 96, 97
Celenterati, 188
Cellule aploidi, 168
Cellule eucariotiche, 133
Cellule germinali, 156
Cellule procariotiche, 133
Centrioli, 153
Cervello umano, 9
Chambers R., 190
Chang S., 61
Cheratina, 215, 218
Chimica prebiotica, 43
Chip, 269
Chitina, 191
Chlamydomonas, 124, 180, 182
Chromobacterium violaceum, 108
Cianidrico, acido, 46
Cianobatteri, 102, 103, 123, 180
Cibersimbiosi, 272
Ciglia, 8, 147
Ciliati, 150
Cinetocori, 152, 153, 169, 173
Cinetosoma, 148
Cisti acritarchiche, 121
Citosina, 56
Claviceps purpurea, 201
Cleveland L.R., 171, 173
Clorofilla a, 141
Clorofilla b, 141
Cloroplasti, 112, 130, 140, 187, 278
Clostridi, 75
Coanomastigoti, 258
Coccolitoforidi, 198
Codice genetico, 55, 58
Codone, 57
Cohen Y., 104
Computer organico, 269
Configurazione 9+2, 147
Coni, 158, 185
Coniugazione, 90
Convergenza, 254
Convergenza orbitale, 219
Convoluta roscoffensis, 272
Copernico, 207
Cordati, 194, 211
Corliss J., 41, 42
Crick F., 5, 11, 55, 87
Criptozoi, 109
Cro-Magnon, 240
Cromonema, 89
Cromosomi, 121, 133, 152, 169, 270
Cromosomica, riduzione, 173
Crossotterigi, 212
Cynognathus, 217

Daisy World, 286, 287, 288
Daptobacter, 135
Darwin C., 8, 42, 73, 128, 148, 190, 207, 220, 243, 274
Darwin E., 190
Dawkins R., 286
Deamer D., 49
Deinotherium, 233
Desmosomi, 181
Desossiribosio, 56
Destrismo, 225
Desulfovibrio, 76
Devoluzione, 243, 249, 258
Dineina, 148
Dinomastigoti, 246
Dinosauri, 210, 215, 216, 243, 255
Diploidia, 169
Dipnoi, 211, 212, 254
Divisione cellulare, 86
DNA (acido desossiribonucleico), 5, 87, 120, 146, 153
DNA egoista, 122
DNA mitocondriale, 135
DNA nucleare, 133
Doolittle W.H.F., 122, 141, 142, 286
Drum R., 271

Echinodermi, 188
Ediacara, fauna di, 188
Effetto serra, 92, 110, 288
Eigen M., 44
Einstein A., 158, 159
Ematite, 105, 106
Emoglobina, 231
Enzima, 44
Enzimi di riparazione, 80
Eosynochoccus, 71
Episomi, 90

Erythrodinium, 246
Escissione-saldatura, 80
Esteve I., 136
Estro, 225
Eubatteri, 139
Eucarioti, 5, 119, 120
Euripteridi, 191
Eusthenopteron, 212
Evans C., 268
Evoluzione, 257
Evoluzione chimica sperimentale, 43
Evoluzione culturale, 257
Evoluzione per simbiosi, 8
Evoluzione umana, 236, 272

Fagi, 90
Fagi litici, 90
Fecondazione, 168, 170, 173
Fermentazione, 5, 74
Ferro, ossidi di, 105
Fissione nucleare, 245
Fitzroy R., 240
Flagelli, 8, 147
Flagellina, 78
Foraminiferi, 198
Fosfolipidi, 48
Fossili chimici, 71
Fotosintesi, 5, 77, 105, 244
Fotosintesi batterica, 106
Fuller B., 256, 281
Funghi, 199, 200
Fusione nucleare, 245
Fuso mitotico, 153, 154

Gaia, ipotesi, 283, 286
Gaia, sistema, 282, 284
Gemmazione, 86
Generazione spontanea, 45
Genoforo, 88, 89
Geroglifici, 237
Ghiandole mammarie, 218
Glaciazioni, 207, 232
Glaessner M., 188
Gnatostomi, 184
Golding W., 282
Gonium sociale, 182
Grafite, 105
Grande rift, 36
Granturco, 262
Griffith F., 86
Guanina, 56
Gunz, glaciazione, 232
Gunz/Mindel, interglaciale, 233

Hadamard J., 158
Hallbauer D.K., 107
Hickey L., 217
Hofmann A., 201
Homo, 229
Homo erectus, 229, 230, 239, 240, 258
Homo habilis, 229, 240, 241
Homo photosyntheticus, 271, 272
Homo sapiens, 208, 229, 230, 238, 241, 258, 260, 266, 270, 283
Homo sapiens neanderthalensis, 230, 239
Homo sapiens sapiens, 230, 239, 240, 241, 242, 247
Hooker J., 190
Huxley J., 60

Ichthyostega, 213
Ideogrammi, 237
Idrogeno, 32, 101
Ife, 199
Impollinazione incrociata, 186
Ingegneria genetica, 6
Innovazione ridondante, 222
Intelligenza, 257, 260
Interglaciali, periodi, 233
Involucro nucleare, 133
Iperciclo, 47
Ipermastigoti, 171, 173
Iridio, 216
Istoni, 135
Isua, formazioni di, 69, 105
Ittiosauri, 195

Jeon K., 125, 126, 127, 130
Johanson D., 231
John P., 137

Kelp, 180
Klein R., 124

Lamarck J.B.P.A. de Monet de, 190
Latte, 218
Leguminose, 9
Lemuri, 219
Lewin R., 140
Lieviti, 180
Lignina, 183
Lincoln A., 116
Linguatulidi, 194
Lisergico, acido, 201
Lovelock J., 92, 114, 282, 285, 284, 285, 286, 287, 289
LSD (dietilammide dell'acido lisergico), 201
Lucy, 231, 240

MacLeod C., 5, 86
Magnetite, 105, 106
Malloch D., 183
Mammiferi, 217
Mammut, 236
Mastigias, 271
Mastigoti pluricellulari, 180
McCarty M., 5, 86
Meiosi, 168, 169, 170, 172, 173, 175
Melanina, 226
Meredith A., 243, 249
Mereschovsky K.S., 123
Mesodinium rubrum, 271
Metabolismo, 134
Metano, 34, 92
Metile, cloruro di, 92
Micorriza, 183
Microbiota, 61
Micrococcus radiodurans, 256
Microprocessori, 269
Microrganismi, 4
Microtubuli, 8, 151, 152, 162
Midollo allungato, 216
Miller S.L., 43
Mills D., 44
Mindel, glaciazione, 232
Mindel/Riss, interglaciale, 233
Missobatteri, 180
Missomiceti, 180
Mitocondri, 6, 7, 112, 115, 119, 121, 130, 133, 134, 135, 187, 265
Mitosi, 152, 169
Mixotricha paradoxa, 151
Monere, regno delle, 120
Movimento, 14
Muller R., 210

Neander J., 240
Nebulose galattiche, 33
Nemesi, 210
Neodinium, 246
Neotenia, 222
von Neumann J., 159, 160, 276, 277
Neurotubuli, 158
Notocorda, 211
Nucleotidi, 44

Ominidi, 228, 230
Oort, nube di, 210
Oort J., 210
Organi rudimentali, 220, 273, 274
Orgel L., 44, 45
Oro, 106
Oscillatoria limnetica, 104
Ossigeno, 101, 255
Ozono, 92, 114, 256

Pangea, 210
Panisset M., 89, 94
Paramecium aurelia, 174, 175
Pasteur L., 95
Peli, 218
Penicillina, 200
Pentastomidi, 194
Petri, piastre di, 243
Piante vascolari, 183
Pietre figurate, 189
Plasmidi, 90, 266
Plastidi, 121, 130, 139, 286
Platt J.R., 244, 248, 249, 278, 282
Pongidi, 228, 229
Porphyridium, 141
Portier P., 134
Prigogine I., 50
Problematica, 191
Procarioti, 5, 119, 120
Prochloron, 141, 142, 278
Profagi, 90
Proscimmie, 219
Protisti, 119, 121, 150

Pteridosperme, 184, 185
Pyrozinski K., 183

Rachitismo, 226
Radiazioni adattative, 215
Raymo C., 119
Razze umane, 238
Repliconi, 88, 89, 90, 247
Resistenza ereditaria, 90
Respirazione aerobica, 5, 119, 134
Rettili, evoluzione dei, 214
Ribonucleico, acido (RNA), 43, 56, 156
Ribosio, 56
Ribosomi, 135
Ribosomi mitocondriali, 135
Ricombinazione, 176
Riftia, 41
Riproduzione, 85, 168, 176
Riproduzione sessuale, 168, 170, 173
Ris H., 124
Riss, glaciazione, 232
Riss/Wurm, interglaciale, 233, 239
Rizobi, 75
RNA (acido ribonucleico), 43, 56, 146
Rocce ferrose, 106
Rodopsina, 97
Ruggine, 106

Sanger F., 59
Sapienza C., 122
Sauri apodi, 214
Schimper A., 123
Schismogenesi, 50
Schizofrenia, 50
Schizophylum commune, 200
Schopf J.W., 105
Scienza, 247
Scimmie antropomorfe, 223, 229
Scissione cariotipica, 270
SDI (*Strategic Defense Initiative*), 248
Segale cornuta, 201
Selezione naturale, 291
Selezione sessuale, 224
Semi, 59
Serpenti, 214
Sesso, 80, 85, 166, 173, 176
Sesso batterico, 81, 85
Sesso meiotico, 165, 167, 170, 171, 175, 200
Sesso procariotico, 85, 165
Sessualità batterica, 175
Seymouria, 215, 217
Simbiosi, 7, 123, 127, 157, 166, 176
Skinner B.F., 247
Sleigh M., 152
Smith D., 146
Solfidrico, acido, 34, 77
Solfobatteri, 102
Solfobatteri purpurei, 77
Solfobatteri verdi, 77
Sonea S., 89, 94
Sorogena, 180
Spencer H., 127
Spiegelman S., 44
Spirochete, 78, 146, 148, 149, 150, 151, 154, 157, 159, 162, 187
Splicing, 80
Spore, 86, 181
Spore asessuali, 200
Steroidi, 138
Sticholonche, 160
Stromatoliti, 108, 109
Stromatoporoidi, 192, 193
Strutture dissipative, 50, 51
Sturgeon T., 257
Sulfolobus, 139
Supernovae, 32
Superorganismi, 264, 286
Synechococcus, 71, 142

Talete, 242
Teosinte, 262
Termiti, 151
Tetrapodi terrestri, 195
Thermoplasma, 137, 139, 197
Thiocapsa, 97
Thomas L., 282
Thompson W.I., 234, 235
Timina, 56
Todd N., 229, 270
Trasduzione, 90
Trasposoni, 90
Treponema pallidum, 149
Trichonympha, 162
Trichoplax, 179, 189
Trilobiti, 189, 243
Tronco cerebrale, 216
Troposfera, 61

Tubuline, 158
Twain M., 207, 208
Tyler S., 68

Uccelli, 218
Undulipodi, 130, 147, 154
Uracile, 56
Urey H.C., 43
Utensili in pietra, 233

Vertebrati, 211
Vesciche natatorie, 212
Virus, 90
Vita, 281
Vita, origine, 3, 41
Vitamina A, 96, 97
Vitamina D, 226
Vitamina E, 111
Volvocine, 181
Volvox, 182

Walcott C., 109, 191
Wallin I., 123, 134
Watson A., 287
Watson J.D., 5, 55, 87
Wegener A., 123
Weinberg S., 31
Weiner S., 197
Wiener N., 275
Wilson A., 231
Witwatersrand, miniere di, 106
Woodward J., 189
Wurm, glaciazione, 232

Φ X174, 59

Zolla del Pacifico, 36

**“Intelligenza
e tecnologia non
ci appartengono in modo
specifico, ma sono
di tutti i viventi,
e forse sopravviveranno
alla nostra specie
in forme del futuro
che vanno al di là
della nostra limitata
immaginazione”**

Lynn Margulis Dorion Sagan Microcosmo